

EFEITOS DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS EM ATERROS FERROVIÁRIOS

Análise Hidrotérmica e Análise Mecânica

MARIANA VILAS BOAS DINIS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor António Joaquim Pereira Viana da Fonseca

Coorientador: Professor Doutor Marcos Arroyo Alvarez de Toledo
Doutor Matteo Oryem Ciantia

JULHO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais e Irmãos

*Eu não me envergonho de corrigir os meus erros e mudar as minhas opiniões, porque não
me envergonho de raciocinar e aprender.*

Alexandre Herculano

AGRADECIMENTOS

No fim de mais uma etapa da minha vida, muitos foram os que contribuíram para o sucesso da mesma. Assim, este percurso que durou 5 anos e, principalmente este último semestre, foi concluído graças a algumas pessoas às quais quero e devo agradecer:

Desejo agradecer muito particularmente ao Professor Doutor António Viana da Fonseca, pela sua disponibilidade e preocupação constante e, principalmente, por toda a ajuda que foi concedendo ao longo de todo o semestre. Foi um privilégio ter sido orientada pelo Professor.

Um agradecimento ao Professor Doutor Marcos Arroyo por me ter concedido esta oportunidade e por todos os ensinamentos e aconselhamento que deu durante a elaboração da tese.

Ao Doutor Matteo Ciantia quero apresentar os meus mais sinceros agradecimentos por toda a ajuda, apoio, incentivo, compreensão, colaboração e tempo dispensado. Foi um privilégio trabalhar ao seu lado.

Tenho de agradecer ainda a todos os restante Professores de Geotecnia por todos os conhecimentos que me transmitiram e por toda a ajuda que prestaram ao longo de todo o ano da especialização.

Ao Professor Doutor Manuel Matos Fernandes pelo seu entusiasmo nas aulas de Mecânica dos Solos o que me levou a desenvolver um fascínio pela Geotecnia.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e à Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona um obrigada pela oportunidade que me deram.

Não poderia faltar um enorme agradecimento à minha família, com especial ênfase aos meus pais e irmãos, em especial à Sara, por todo o apoio e carinho que foram dando, não só ao longo da elaboração da dissertação, mas também ao longo de todo o meu percurso académico.

Aos meus amigos, obrigada pela vossa amizade e companheirismo que foram sempre importante na realização desta tese. Apesar de não participarem diretamente na elaboração da mesma, sem vocês seria tudo muito mais difícil.

E, finalmente, tenho de dar um agradecimento muito especial ao João essencialmente pela paciência, pelos momentos partilhados e por todo o encorajamento que me deu, principalmente nos momentos de maior aflição.

Um enorme Obrigada sincero a Todos.

RESUMO

Verificar os efeitos que as alterações atmosféricas provocam no interior dos aterros ferroviários é o objetivo primordial desta dissertação. Um outro propósito é verificar se a substituição do solo de fundação destes aterros por materiais mais grosseiros, isto é, enrocamentos, acarreta algum tipo de vantagens face aos assentamentos provocados devido às alterações atmosféricas.

De forma a estudar o referido, este trabalho apresenta-se com quatro casos, sendo eles: um caso base, onde o aterro está sujeito a um clima húmido e a um clima seco, e um aterro com enrocamento no solo de fundação também sujeito a ambos os distintos climas.

Inicialmente, será realizada uma análise hidrotérmica no programa de cálculo *Code_Bright*, onde se analisarão algumas das variáveis mais relevantes, nomeadamente grau de saturação dos materiais do aterro, sucção e os fluxos de água. Esta análise irá ser feita para um período de 10 anos. A partir destes resultados, ir-se-á prever, através da metodologia AASHTO, os assentamentos que os aterros experimentam devido às alterações de humidade e temperatura no seu interior. Para tal é necessário obter as deformações verticais obtidas num modelo pseudo-elástico, o qual é realizado no programa *Plaxis*.

Nos primeiros capítulos desta dissertação, será feita uma abordagem aos solos não saturados assim como a alguns aspetos relacionados com este tema (capítulo 2) e às plataformas ferroviárias, nomeadamente o contraste de uma via sob balastro com uma via com via em laje e o tipo de perfil e evolução dos assentamentos expectáveis nestas obras de terra (capítulo 3).

O capítulo 4 será dedicado ao tipo de modulação realizada no programa *Code_Bright* e uma breve explicação do mesmo, uma vez que se trata de um programa de cálculo pouco usual.

Como a metodologia AASHTO utilizada é um processo de cálculo pouco recorrente, no capítulo dedicado à análise mecânica, será descrito pormenorizadamente este método.

No final, serão formuladas as principais conclusões de todo este trabalho e serão feitas algumas sugestões de possíveis e interessantes desenvolvimentos futuros no âmbito de toda esta temática.

PALAVRAS-CHAVE: solos não saturados, aterros ferroviários, condições atmosféricas, análise hidrotérmica e mecânica, guia AASHTO

ABSTRACT

This report aims at verifying the effects atmospheric changes pose inside the railway embankments. Another purpose is to check whether the replacement of the foundation soil of these embankments by coarser materials, ie, rockfills bring about any kind of asset compared to the settlements caused by atmospheric changes.

Therefore this report presents four cases: a base case where the embankment is subject to a wet climate and a dry one and a rockfill embankment on the soil foundation also subject to both distinct climates.

Firstly, an hydrothermal analysis will be done on the Code Bright spreadsheet application which will analyze some of the most relevant variables, namely the degree of saturation of the embankment materials, suction and the water flows. This analysis will be performed for a period of 10 years.

From these results, we will foresee, by means of the AASHTO methodology, the settlements that embankments go through due to humidity and temperature changes. For that we will need to get the vertical deformations obtained in a pseudo-elastic model which is done on the *Plaxis* program.

On the first chapters of this report we will do an approach to unsaturated soils as well to some aspects related to this topic (chapter 2) and railway platforms, namely the contrast between a ballasted track and a slab track and the profile type and the settlements evolution expected in this kind of earthworks.

Chapter 4 will be dedicated to the type of modelling done on the Code Bright application and to a brief explanation of this application once it is an unusual spreadsheet application.

As the AASHTO method is a hardly used calculation process, this method will be described in detail in the chapter on mechanical analysis.

At the end, we bring about the main conclusions of this work and suggest possible and interesting future developments on this issue.

KEYWORDS: unsaturated soils, railway embankments, atmospheric conditions, hydrothermal and mechanical analysis, AASHTO guide

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS	1
1.2. ORGANIZAÇÃO ESTRUTURAL	2
 2. SOLOS NÃO SATURADOS	 5
2.1. DEFINIÇÃO	5
2.2. TENSÕES EFETIVAS E RESISTÊNCIA	6
2.2.1. RESISTÊNCIA	7
2.3. SUCÇÃO	8
2.3.1. SUCÇÃO MATRICIAL	8
2.3.2. SUCÇÃO OSMÓTICA	9
2.3.3. SUCÇÃO TOTAL	9
2.4. EFEITOS DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS	10
2.4.1. EFEITOS DA EVAPORAÇÃO E PRECIPITAÇÃO	11
2.4.2. EFEITOS DA HUMIDADE RELATIVA	13
2.5. CURVA DE SATURAÇÃO	14
2.6. FLUXO DE ÁGUA E AR	15
2.6.1. FLUXO DE ÁGUA	16
2.6.2. FLUXO DE AR	16
 3. PLATAFORMAS FERROVIÁRIAS	 19
3.1. INTRODUÇÃO	19
3.2. INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA	19
3.2.1. CAMADAS DE APOIO	20
3.2.2. ATERRO	20
3.3. VIA EM LAJE	21

3.3.1. DESCRIÇÃO E PROCEDIMENTOS CONSTRUTIVOS	21
3.3.2. VIA SOBRE BALASTRO VS. VIA EM LAJE	21
3.3. ASSENTAMENTOS EM ESTRUTURAS FERROVIÁRIAS	23
3.4. USO DE MATERIAL DE ENROCAMENTO NO SOLO DE FUNDAÇÃO	24
3.4.1 PROCEDIMENTO CONSTRUTIVO	25
 4. MODELAÇÃO NUMÉRICA	 27
4.1. INTRODUÇÃO	27
4.2. PROGRAMA COMPUTACIONAL: <i>CODE_BRIGHT</i> E <i>GiD</i>	27
4.2.1. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO <i>CODE_BRIGHT</i>	27
4.3. GEOMETRIA E MALHA	29
4.3.1. GEOMETRIA	29
4.3.2. MALHA	29
4.4. MATERIAIS	30
4.5. CLIMA	32
4.5.1. CLIMA DE SAN SEBASTIÁN	34
4.5.2. CLIMA DE ANTEQUERA	36
 5. ANÁLISE HIDROTÉRMICA	 39
5.1. INTRODUÇÃO	39
5.2. CONDIÇÕES INICIAIS E CONDIÇÕES DE FRONTEIRA	40
5.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS	42
5.3.1. GRAU DE SATURAÇÃO	42
5.3.2. TEOR EM ÁGUA	43
5.3.3. SUCCÃO	43
5.3.4. ANÁLISE DO CLIMA HÚMIDO	43
5.3.5. ANÁLISE DO CLIMA SECO	51
5.3.6. CONCLUSÕES	58
 6. ANÁLISE MECÂNICA	 61
6.1. INTRODUÇÃO	61
6.2. MODELAÇÃO NO <i>PLAXIS2D</i>	62

6.3. METODOLOGIA AASHTO.....	63
6.3.1. ASSENTAMENTOS DEVIDO AO PESO PRÓPRIO.....	63
6.3.2. ASSENTAMENTOS DEVIDO AO TRÁFEGO	65
6.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	67
6.4.1. ANÁLISE DO CLIMA HÚMIDO	69
6.4.2. ANÁLISE DO CLIMA SECO	71
6.4.3. ANÁLISE GLOBAL.....	73
6.4.4. ESTIMATIVA DOS ASSENTAMENTOS DEVIDOS ÀS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS	78
6.4.5. CONCLUSÕES.....	83
 7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	 85
7.1. CONCLUSÕES	85
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	86
 ANEXOS	 91
I. SAN SEBASTIÁN: 2000 A 2009	91
II. ANTEQUERA: 2001 A 2010.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Divisão da Mecânica dos Solos segundo Fredlund e Rahardjo, (1993)	5
Figura 2- Elemento de um solo não saturado (Fredlund, 1993)	6
Figura 3 - Envolvente de rotura de MC para solos não saturados (Fredlund e Rahardjo, 1993)	7
Figura 4 - Tubos capilares com diferentes raios de menisco (Janssen & Dempsey, 1980)	9
Figura 5 - Sucção Total, Matricial e Osmótica medidas numa argila compactada num terreno glacial (adaptado de Fredlund, 1993)	10
Figura 6 - Ciclo Hidrológico (adaptado de Lu, N. e Likos, W.,2004)	11
Figura 7- Evolução da variação do peso da água, teor em água para duas profundidades e sucção com o período de referência em três profundidades (adaptado de Manucos, C., Jommi, Cristina e D'Onza, F., 2012)	12
Figura 8 - Relação da Sucção Total com a Humidade Relativa a uma temperatura de 293.16 K (adaptado de Lu e Likos, 2004)	13
Figura 9 - Curva Característica Teórica de um solo não saturado (adaptado de Lu e Likos, 2004)	14
Figura 10 - Tipos de fluxo comuns em solos não saturados	15
Figura 11 - Corte de uma infraestrutura ferroviária	19
Figura 12 - Sistemas construtivos de linhas férreas a) via sobre balastro b) via em laje	21
Figura 13 - Comparação do valor em € por metro de via-férrea consoante seja em via em laje ou via assente sobre balastro, (Schilder y Diederich, 2007)	23
Figura 14 - Assentamentos experimentados no aterro (UIC, 2008)	24
Figura 15 – Evolução dos assentamentos com o tempo (UIC, 2008)	24
Figura 16 - Diferentes soluções de desenho da técnica de substituição propostas por Rollings y Rollings (1996)	25
Figura 17 - Geometria do aterro	29
Figura 18 - Malha gerada	30
Figura 19 - Curvas Granulométricas dos vários materiais	31
Figura 20 - Curvas de Retenção dos vários materiais	32
Figura 21 - Mapa Ibérico segundo a classificação atmosférica de Köppen (1936)	33
Figura 22 - Valores de precipitação em San Sebastián para o ano de 2004	35
Figura 23 - Valores de humidade relativa média em San Sebastián para o ano de 2004	35
Figura 24 - Valores de temperatura média em San Sebastián para o ano de 2004	35
Figura 25 - Valores de precipitação em Antequera para o ano de 2008	37
Figura 26 - Valores de humidade relativa média em Antequera para o ano de 2008	37
Figura 27- Valores de temperatura média em Antequera para o ano de 2008	37

Figura 28 - Esquema do caso base.....	41
Figura 29 - Esquema do aterro com enrocamento.....	41
Figura 30 - Série da precipitação utilizada para ambos os climas no período de 10 anos.....	42
Figura 31 -Evolução do grau de saturação ao longo do tempo para o caso base.....	44
Figura 32 - Evolução do grau de saturação ao longo do tempo para o aterro com enrocamento.....	44
Figura 33 - Evolução da sucção ao longo do tempo para o caso base	45
Figura 34 - Evolução da sucção ao longo do tempo para o aterro com enrocamento	45
Figura 35 - Grau de Saturação do aterro caso base após 6 meses - imagem retirada do Code_Bright	45
Figura 36 - Grau de Saturação do aterro caso base após 48 meses (4 anos) - imagem retirada do Code_Bright.....	46
Figura 37 - Grau de Saturação do aterro caso base após 120 meses (10 anos) - imagem retirada do Code_Bright.....	46
Figura 38 - Grau de Saturação do aterro com enrocamento após 6 meses - imagem retirada do Code_Bright.....	46
Figura 39 - Grau de Saturação do aterro com enrocamento após 48 meses (4 anos) - imagem retirada do Code_Bright.....	47
Figura 40 - Grau de Saturação do aterro com enrocamento após 120 meses (10 anos) - imagem retirada do Code_Bright.....	47
Figura 42 - Evolução da sucção para ambos os aterros no leito do pavimento	48
Figura 41 - Evolução do grau de saturação para ambos os aterros no leito do pavimento.....	48
Figura 43 - Evolução do grau de saturação para ambos os aterros no núcleo	49
Figura 44 - Evolução da sucção para ambos os aterros no núcleo	49
Figura 45 - Sentido positivo dos eixos em ambas as direções adotado no programa Code_Bright	50
Figura 46 - Evaporação no aterro caso base após 5 meses – imagem retirada do Code_Bright	51
Figura 47 - Evaporação no aterro caso base após 48 meses (4 anos) – imagem retirada do Code_Bright.....	51
Figura 48 - Evolução do grau de saturação ao longo do tempo no caso base.....	52
Figura 49 - Evolução do grau de saturação ao longo do tempo no aterro com enrocamento.....	52
Figura 50 - Evolução da sucção ao longo do tempo no caso base	53
Figura 51 - Evolução da sucção ao longo do tempo no aterro com enrocamento.....	53
Figura 52 - Grau de Saturação do aterro caso base após 6 meses – imagem retirada do Code_Bright	53
Figura 53 - Grau de Saturação do aterro caso base após 120 meses (10 anos) – imagem retirada do Code_Bright.....	54

Figura 54 - Grau de Saturação do aterro com enrocamento após 6 meses – imagem retirada do Code_Bright.....	54
Figura 55 - Grau de Saturação do aterro com enrocamento após 120 meses (10 anos) – imagem retirada do Code_Bright	54
Figura 56 - Evolução do grau de saturação para ambos os aterros no leito do pavimento	55
Figura 57 - Evolução da sucção para ambos os aterros no leito do pavimento	56
Figura 58 - Evolução do grau de saturação para ambos os aterros no núcleo	57
Figura 59 - Evolução da sucção para ambos os aterros no núcleo	57
Figura 60 - Geometria e malha utilizadas no Plaxis.....	62
Figura 61 - Assentamentos totais verificados no eixo do aterro com enrocamento sujeito ao clima húmido.....	68
Figura 62 - Assentamentos verificados em várias zonas do aterro devidos tráfego para o aterro com enrocamento sujeito ao clima húmido.....	68
Figura 63 - Evolução dos assentamentos devido ao peso próprio e tráfego no eixo do carril sujeito ao clima húmido	69
Figura 64 - Evolução dos assentamentos no eixo do carril devido ao peso próprio, tráfego e total para o aterro caso base.....	70
Figura 65 - Evolução dos assentamentos no eixo do carril devido ao peso próprio, tráfego e total para o aterro com enrocamento	70
Figura 66 - Evolução dos assentamentos devido ao peso próprio e tráfego no eixo do carril sujeitos ao clima seco.....	71
Figura 67 - Evolução dos assentamentos no eixo do carril devido ao peso próprio, tráfego e total para o caso base	72
Figura 68 - Evolução dos assentamentos no eixo do carril devido ao peso próprio, tráfego e total para aterro o com enrocamento	72
Figura 69 - Comparação dos assentamentos finais para todos os casos analisados aos 4 anos	74
Figura 70 - Comparação dos assentamentos finais para todos os casos analisados aos 10 anos	75
Figura 72 - Assentamentos verificados no aterro devido ao tráfego – aterro com enrocamento sujeito ao clima húmido	76
Figura 71 - Assentamentos verificados no aterro devido ao tráfego – aterro caso base sujeito ao clima húmido.....	76
Figura 74 - Assentamentos verificados no aterro devido ao tráfego – aterro com enrocamento sujeito ao clima seco.....	77
Figura 73 - Assentamentos verificados no aterro devido ao tráfego – aterro caso base sujeito ao clima seco	77
Figura 75 - Assentamentos devido ao peso próprio no eixo do aterro – caso base com clima húmido	79
Figura 76 - Assentamentos devido ao tráfego no eixo do aterro – caso base com clima húmido	79

Figura 77 - Assentamentos devido ao tráfego no alinhamento da esquerda – caso base com clima húmido	80
Figura 78 - Assentamentos devido ao tráfego no eixo do carril - caso base com clima húmido	80
Figura 79 - Assentamentos devido ao tráfego no alinhamento da direita – caso base com clima húmido	81

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Equações propostas por alguns autores para a definição da curva de retenção (adaptado de Fredlund, 2000)	15
Tabela 2 - Equações e Leis que regem o programa Code_Bright (Code_Bright User's Guide, 2013)	28
Tabela 3 - Características dos materiais de cada camada do aterro	30
Tabela 4 - Valores médios registados em San Sebastián para o ano de 2004.....	34
Tabela 5 - Valores médios registados em Antequera para o ano de 2008	36
Tabela 6 - Quantidade de água que entra no aterro pela base e lateral	50
Tabela 7 - Balanço final da evaporação no aterro	50
Tabela 8 - Quantidade de água que entra no aterro pela base e lateral	58
Tabela 9 - Balanço final da evaporação no aterro	58
Tabela 10 - Tabela 2.3.8 adaptada do guia AASHTO	64
Tabela 11 - Valores de alguns parâmetros das expressões 22 e 23.....	66
Tabela 12 - Parâmetro de calibração para materiais granulares e materiais de subleito.....	66
Tabela 13 - Percentagem de assentamento devido às mudanças atmosféricas nos assentamentos devido ao peso próprio em todos os casos estudados para t=10 anos.....	82
Tabela 14 - Percentagem de assentamento devido às mudanças atmosféricas nos assentamentos devido ao tráfego em todos os casos estudados após a via ser colocada em serviço	82

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Alfabeto Latino

c' - Coesão

C - Concentração de ar

D_a - Constante de transmissão de fluxo de ar através do solo

D_a^* - Função das propriedades de volume e massa do solo

e – Índice de vazios

E – Módulo de deformabilidade

E_r – Módulo resiliente

F_{env} – Fator ambiental

HR – Humidade relativa

i_c – Fluxo de calor

i_g^a - Fluxo de materiais solúveis

i_g^w – Fluxo de vapor de água

i_{wy} – Gradiente hidráulico

J_a - Taxa de ar que flui através de uma unidade de solo

K – Coeficiente de permeabilidade

k_w - Coeficiente de permeabilidade para a fase da água

$M_{r,opt}$ – Módulo resiliente

M_r – Módulo resiliente em condições ótimas

N – Número de repetições de tráfego

P – Precipitação

P_a - Massa de água

P_s - Massa de solo seco

P_g – Pressão gás

P_l – Pressão líquida

q_g - Fluxo gasoso

q_l - Fluxo líquido

R – Constante universal do gás

S – Sucção

S_E - Assentamento do aterro

S_U - Assentamento da fundação

S_v - Assentamento devido à carga transmitida pelo tráfego

S_r – Grau de saturação

T – Temperatura

u - Deslocamento

u_a – Pressão ar

u_w – Pressão água

u_{w0} – Volume de água específico

V_w – Volume de água

V_v - Volume de vazios

w – Teor em água

w_{opt} – Teor em água ótimo

Alfabeto Grego

ϕ^b – Ângulo de atrito associado à sucção matricial

ϕ' – Ângulo de atrito entre as partículas

Ψ – Ângulo de dilatação

U – Coeficiente de Poisson

δ - Deformação plástica

ε_v – Deformação vertical

ε_r – Deformação de referência imposta em laboratório

ω_v – Massa molecular do vapor de água

χ – Parâmetro das tensões efetivas

γ^{sat} – Peso volúmico saturado

γ^{dry} – Peso volúmico seco

ρ_a - Pressão absoluta do ar.

Ψ_m - Sucção matricial

Ψ_o - Sucção osmótica

Ψ_t – Sucção total

U_w - Taxa de fluxo de água

σ – Tensão total

σ' – Tensão efetiva

Siglas

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

ADIF - Administrador de Infraestructuras Ferroviarias

CEMOSA - Centro de Estudios de Materiales y Control de Obra

CF – Leito do pavimento

CIMNE - International Center for Numerical Methods in Engineering

ECAD - European Climate Assessment & Dataset

ENR - Enrocamento

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Figs. – Figuras

IFAPA - Instituto de Investigacion y Formacion Agraria y Pesquera

IP – Índice de plasticidade

LAV - Linhas Alta Velocidade

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de plasticidade

MC - Mohr Coloumb

MEF – Métodos dos elementos finitos

PP – Peso próprio

PSA – Parte superior do aterro

SWCC – Soil-Water Characteristic Curve

TH – Análise hidrotérmica

THM – Análise termo-hidro-mecânica

UIC - International Union of Railways

UPC – Universitat Politècnica de Catalunya

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

A Geotecnia tem-se tornado nos últimos anos uma área cada vez mais importante da Engenharia Civil, uma vez que todas as obras estão, direta ou indiretamente, interligadas com a mesma na medida em que o fator comum a todas as estruturas e edificações é o solo. Ultimamente, tem-se dado uma maior relevância à caracterização dos solos, que estão na base de qualquer tipo de obra. No entanto, não é apenas a caracterização dos terrenos que engloba a Geotecnia, pois esta também abrange as fundações dos edifícios e estruturas, obras de suporte de terras, barragens, obras subterrâneas, estabilidade de taludes, obras subterrâneas, aterros, entre outras. Para além disso, num passado recente, o controlo das vibrações provocadas pelas explosões, problemas de liquefação, melhoramento do solo, entre outros problemas, têm ganho uma importância crescente.

Esta tese resulta de um trabalho realizado pelo CIMNE (International Center for Numerical Methods in Engineering) na UPC (Universitat Politècnica de Catalunya). Por solicitação da Universidade de Málaga, o CIMNE estudou os efeitos que as condições atmosféricas provocavam nos assentamentos em aterros para linhas férreas de alta velocidade. Assim, este estudo surgiu para analisar a possibilidade de construir os referidos aterros, em Espanha, com o sistema de via em laje. Os estudos realizados pelo CIMNE e pela Universidade de Málaga podem ser encontrados em Universidad Politècnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica, Gran Capitán s/n. Módulo D-2, UNIVERSIDAD DE MÁLAGA. PROYECTO FASTRACK, Barcelona, Universidad Politècnica de Catalunya, e em Universidade de Málaga, Grupo de Investigación HUM-064 (2013), Entregable E.1.1: *Definición de las técnicas de mejora del terreno requeridas en la subestructura ferroviaria por el nuevo sistema de vía en placa*, Málaga, Universidade de Málaga respetivamente.

A essência da investigação elaborada pelo CIMNE, mencionada anteriormente, foi uma análise dos assentamentos pelo período médio de dez anos para várias hipóteses de aterros: diferentes geometrias, materiais e sistemas de drenagem e impermeabilização, usando geomembranas. O recurso a aterros neste tipo de obras, linhas ferroviárias para comboios de alta velocidade, justifica-se pela necessidade de regularização do relevo, num equilíbrio de escavações e aterros para propensa minimização dos custos económicos e dos impactes ambientais. Os assentamentos revelam-se importantes pois podem condicionar a estabilidade da estrutura a médio e longo prazo, daí que o seu estudo pormenorizado seja uma valiosa ajuda para prolongar o período de vida da obra.

Neste trabalho, ir-se-á utilizar os mesmos métodos e as hipóteses de base utilizadas num estudo anterior (Universidad Politècnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica, Gran Capitán s/n. Módulo D-2, UNIVERSIDAD DE MÁLAGA.

PROYECTO FASTRACK, Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña) mas recorrendo a uma diferente técnica de drenagem para os aterros: substituição do material da fundação por materiais mais grosseiros, os chamados enrocamentos. Este material é, por vezes, utilizado na fundação dos aterros para linhas de alta velocidade de forma a diminuir os assentamentos e/ou facilitar a drenagem. É, ainda, de referir que, para além das vantagens referidas, este material permite uma diminuição dos assentamentos devido às condições atmosféricas, na medida em que podem agir como barreiras à capilaridade ascendente, isolando hidraulicamente os materiais do aterro da água situada abaixo do nível freático.

Desta forma, um dos principais objetivos desta dissertação é mostrar os efeitos das condições atmosféricas neste tipo de obras. Este é um tema que não está completamente estudado e clarificado, pelo que poderá ser uma mais-valia futuramente. Ir-se-á realizar um estudo em duas zonas com climas distintos (um clima seco e um clima húmido), de modo a avaliar os efeitos que a humidade, temperatura e precipitação têm nestas obras de terra. O clima seco pertence à região de Antequera enquanto o clima húmido pertence a San Sebastián, ambas situadas em Espanha.

Assim, far-se-á uma análise hidrotérmica e uma análise mecânica que serão realizadas no programa de cálculo de elementos finitos *Code_Bright* (desenvolvido na UPC há 20 anos e inicialmente descrito por Olivella et al. em 1996) e *Plaxis*, respetivamente. A análise hidrotérmica focar-se-á num estudo dos valores do grau de saturação e sucção em profundidade durante o período de dez anos, enquanto a análise mecânica ir-se-á focar num estudo detalhado dos valores dos assentamentos gerados neste aterro durante o mesmo período de tempo, quando sujeito a estas variações atmosféricas e passagem de tráfego. É de salientar que não se irá realizar a modelação no programa *Plaxis* uma vez que, como esta dissertação é resultado de um trabalho já realizado, foram fornecidos os resultados das deformações obtidas no neste programa para o caso de um aterro com as mesmas características do que se irá estudar. Desta forma, não faria sentido repetir todo o processo de modelação e cálculo no *Plaxis*.

1.2. ORGANIZAÇÃO ESTRUTURAL

Os problemas geotécnicos estão frequentemente enquadrados em solos que se encontram parcialmente saturados e, como são este tipo de solos que usualmente subsistem nos locais a construir, no capítulo 2 começa-se por fazer um levantamento do estado de arte da mecânica dos solos não saturados e ao seu comportamento, uma vez que são estes solos que vão constituir os aterros questão objeto desta dissertação. Assim, procura-se fazer uma breve introdução e definição deste tipo de solos, abordar a questão da sucção e, ainda, mostrar alguns dos efeitos que as condições atmosféricas têm nos solos parcialmente saturados.

Uma vez que um dos principais objetivos desta tese é verificar as vantagens que os materiais de enrocamento têm quando utilizados na fundação dos aterros ferroviários, no capítulo 3 far-se-á uma breve alusão a este tipo de barreiras capilares. É, ainda, neste que se começa por fazer uma pequena referência às infraestruturas ferroviárias e respetivos aterros, seguindo-se uma descrição não muito detalhada do sistema de via em laje.

O capítulo 4 é inteiramente dedicado ao tipo de modelação numérica utilizada no programa de cálculo adotado. Começa-se por definir os programas usados: *Code_Bright* e *GiD*. É, também, neste capítulo que se descrevem a geometria das estruturas de aterro analisadas e os materiais utilizados nas suas várias camadas e as respetivas curvas de saturação/retenção. Para além disso, faz-se uma descrição dos tipos de climas associados a cada uma das regiões mencionadas anteriormente.

Seguidamente, procede-se à descrição da análise hidrotérmica conduzida neste estudo, estando a modelação numérica detalhada no capítulo 5. Aí se apresentam os parâmetros adotados e o modelo utilizado. Todos os resultados serão aqui analisados e tiradas as respetivas conclusões.

Finalmente, no capítulo 6, é realizada a análise geomecânica, onde, mais uma vez, se define o tipo de modelo utilizado. Faz-se uma breve explicação da metodologia AASHTO, uma vez que esta irá ser utilizada para calcular os assentamentos experimentados pelo aterro. Seguidamente, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos de forma a compreender o comportamento global do aterro em questão.

No final, retiram-se as principais conclusões de toda a tese e apresentam-se alguns desenvolvimentos futuros que podem ser decorrentes do trabalho realizado e que sejam relevantes para o tema desenvolvido.

Em anexo, colocaram-se, ainda, as séries temporais utilizadas nesta dissertação.

2

SOLOS NÃO SATURADOS

2.1. DEFINIÇÃO

A diferença dos solos saturados e não saturados destaca-se no comportamento mecânico de ambos os tipos de solos. Assim, Fredlund & Rahardjo (1993) propõem que a Mecânica dos Solos seja constituída por solos saturados e solos não saturados, segundo esta divisão:

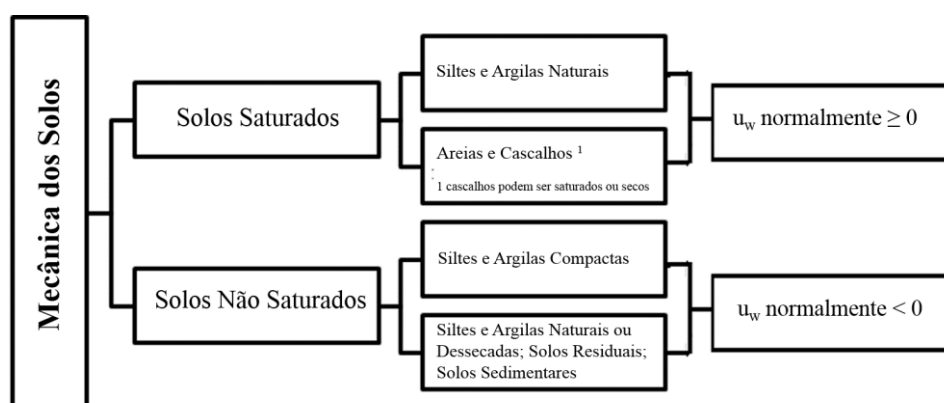


Figura 1 - Divisão da Mecânica dos Solos segundo Fredlund e Rahardjo, (1993)

Os solos não saturados (figura 2) são compostos por três fases: parte sólida, água e ar, segundo a Teoria Clássica da Mecânica dos Solos Não Saturados. No entanto, há quem defenda que existe uma quarta fase, nomeadamente Fredlund e Morgenstern (1978). Surge, então, a “Teoria Vanguardista” da Mecânica dos Solos Não Saturados que defende que estes solos são compostos por quatro fases: parte sólida, água, ar e interface água-ar. Esta quarta fase, constituída pela interface água-ar ou também conhecida por diafragma contrátil ou menisco, é responsável pelas tensões de tração, também designada por tensão superficial.

Pode-se considerar um solo não saturado como um sistema trifásico, uma vez que o volume da quarta fase (interface água-ar) é muito reduzido e a sua massa pode ser desprezável (considera-se que a massa da fase contrátil faz parte da massa de água). Apesar disso, quando se analisa as tensões, não se pode negligenciar esta fase, uma vez que esta apresenta um comportamento independente das outras fases. Como a película contrátil não impregna uma mudança significativa no comportamento dos solos não saturados, normalmente considera-se diretamente o efeito da sucção ao invés desta quarta fase.

Estes solos, compostos por água e ar nos seus poros, usualmente exibem pressões negativas de água dos poros em relação às pressões de ar dos poros.

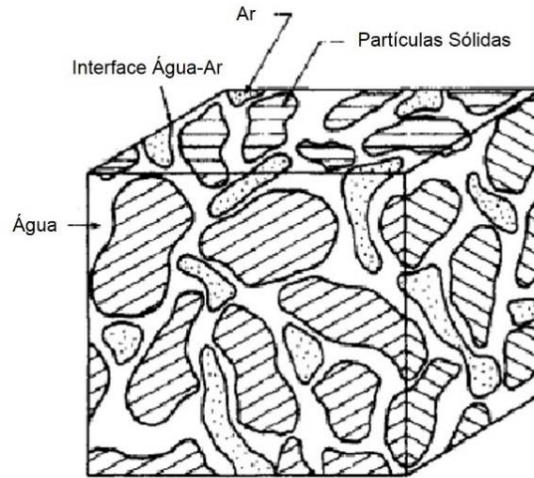


Figura 2- Elemento de um solo não saturado (Fredlund, 1993)

Um dos parâmetros que permite distinguir solos saturados de não saturados é o grau de saturação, S_r . O grau de saturação exprime a quantidade de água que preenche os vazios de um solo. Usualmente, considera-se que um solo seco tem um grau de saturação de 0% e um solo saturado um grau de saturação de 100%. Assim, os solos não saturados apresentam um grau de saturação entre 0 e 100. A expressão seguinte exprime o grau de saturação em função do volume de água, V_w e do volume de vazios, V_v :

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (1)$$

2.2. TENSÕES EFETIVAS E RESISTÊNCIA

A expressão de Terzaghi das tensões efetivas (2) para solos saturados pode ser alargada para solos não saturados, acrescentando a tensão do ar dos poros e a sucção matricial, ou seja, a diferença entre a pressão de ar dos poros e a pressão da água dos poros. Bishop (1959), deduziu, então, a expressão 3 para solos não saturados:

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (2)$$

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w) \quad (3)$$

Sendo σ a tensão normal total, σ' a tensão normal efetiva, u_a a pressão do ar e u_w a pressão da água.

O parâmetro χ (parâmetro das tensões efetivas ou parâmetro de sucção de Bishop) pode variar entre 0 e 1, correspondendo o fator 0 a solos completamente secos e o fator 1 a solos saturados e fica, por isso, a expressão exatamente igual à de Terzaghi. Este parâmetro varia com o grau de saturação dos poros do material, Fredlund (1993).

Há, ainda, estudos teóricos que defendem que este parâmetro pode ser superior à unidade, no entanto, como esses estudos não são muito relevantes para o tema em questão, aconselha-se a leitura do livro de Lu, N., Likos, W. (2004), *Unsaturated Soil Mechanics*, Capítulos 5 e 6.

Assim, após esta breve explicação, pode-se afirmar que os solos não saturados têm um grau mais elevado de complexidade no seu estudo, no âmbito da mecânica dos solos, uma vez que o seu comportamento é mais imprevisível.

2.2.1. RESISTÊNCIA

No caso dos solos saturados, a resistência pode ser apresentada segundo a expressão 4, respeitando o critério de rotura de Mohr-Coloumb.

$$\tau_f = c' + \sigma' \times \tan \phi' = c' + (\sigma - u)_f \times \tan \phi' \quad (4)$$

Como era de esperar, para analisar a resistência de um solo em condições não saturadas, é necessário ter em atenção a presença do ar, pelo que Fredlund et al. (1978) formulou uma expressão proveniente do critério de rotura de Mohr-Coloumb:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \times \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \times \tan \phi^b \quad (5)$$

Sendo c' a coesão efetiva (de teor “cimentício”), $(\sigma - u_a)$ a tensão normal líquida no plano de rotura, ϕ' o ângulo de atrito entre as partículas, $(u_a - u_w)$ a sucção matricial e ϕ^b o ângulo de atrito interno associado à sucção matricial.

Os primeiros termos (coesão e tensão normal) descrevem o critério de rotura de Mohr-Coloumb de um solo saturado, enquanto o terceiro termo representa o aumento da tensão de corte com o aumento da sucção matricial em solos não saturados.

Assim, é fácil de perceber que quando o solo se torna saturado, a tensão matricial anula-se, uma vez que a pressão da água tende a igualar a pressão do ar, transformando-se a expressão 5 na 4.

Segundo a expressão 5, a envolvente de rotura de Mohr-Coloumb pode ser ilustrada da seguinte forma:

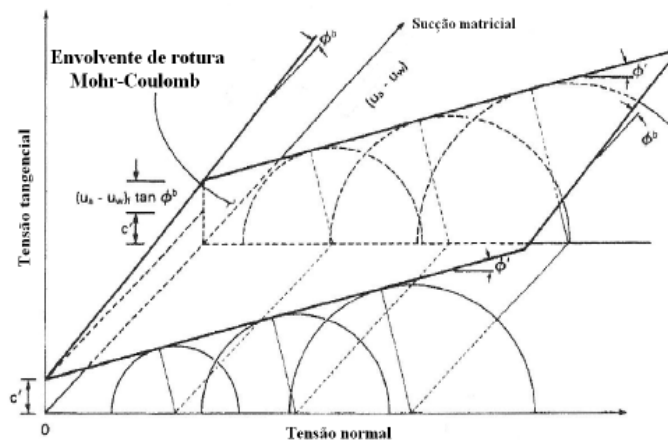


Figura 3 - Envolvente de rotura de MC para solos não saturados (Fredlund e Rahardjo, 1993)

2.3. Sucção

A sucção é composta por duas componentes principais: sucção matricial ($u_a - u_w$) e sucção osmótica. A sucção matricial resulta da combinação da capilaridade com as forças de adsorção e representa a energia essencial para mobilizar uma molécula de água através do solo. A sucção osmótica resulta dos solutos dissolvidos na água dos poros, sendo uma tensão adicional que os sais produzem.

Viana da Fonseca (1998) refere que Brady (1983) identificou duas forças importantes que afetam a energia livre da água do solo: a força matricial e a força osmótica.

2.3.1. SUCÇÃO MATRICIAL

Como explicitado anteriormente, a sucção matricial é o resultado da capilaridade com as forças de adsorção. Esta sucção existe devido à atração dos sólidos existentes no solo pela água, que reduz a energia livre das moléculas de água absorvidas.

A capilaridade é o processo da ascensão da água acima do nível freático, gerada pela tensão superficial. Esta acontece quando as forças entre as partículas de solo e a água são maiores que as forças de coesão entre as partículas de água. As forças de adsorção são, segundo Viana da Fonseca (1998), a atração dos sólidos do solo e os iões permutáveis da água.

$$\Psi_m = (u_a - u_w) \quad (6)$$

Num solo não saturado, a interface ar-água está sujeita a uma pressão de ar superior à pressão da água, sendo a diferença entre ambas a sucção matricial. Esta varia com as mudanças ambientais pois, para além de depender do grau de saturação do solo, também depende da humidade relativa (HR) do meio, como se irá ver no capítulo 2.3.3.

2.3.1.1. CAPILARIDADE

A capilaridade é um fenómeno importante, na medida em que pode comprometer a durabilidade e estabilidade dos aterros, pois provoca uma diminuição da resistência, gerada pelos meniscos presentes em solos não saturados. Esta resulta da tensão superficial da água, que é resultado das forças intermoleculares da interface água-ar.

Experiências efetuadas vêm provar que a água sobe por capilaridade através dos interstícios de pequenas dimensões que as partículas sólidas do solo formam. Normalmente, a altura que a água consegue alcançar depende da natureza e material do solo em questão e do diâmetro dos vazios.

Janssen e Dempsey (1980), efetuaram uma experiência com tubos capilares, exibindo a interface água-ar para diferentes raios de curvatura do menisco. Assim, como se observa na figura 4, compreende-se que o fenómeno da capilaridade é mais visível para dimensões menores dos vazios existentes no solo, enquanto que para vazios com uma ordem de grandeza maior pode-se praticamente desprezar.

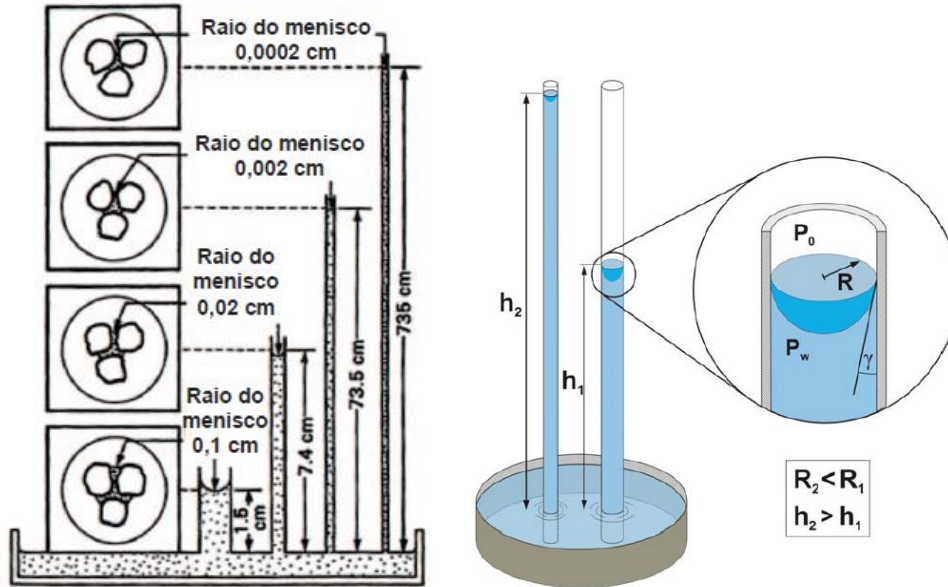


Figura 4 - Tubos capilares com diferentes raios de menisco (Janssen & Dempsey, 1980)

2.3.2. SUCÇÃO OSMÓTICA

A sucção osmótica reduz a energia livre da água e este fenômeno é originado pela solução do solo, isto é, dos solutos dissolvidos na água existente nos poros.

Os solutos dissolvidos na água dos poros podem ter duas origens: externa, isto é, são produtos provenientes do processo de lixiviação que se misturam com a água presente nos poros ou podem ser solutos absorvidos naturalmente pelos minerais constituintes do solo.

Foram realizados estudos para analisar a importância da sucção osmótica. Alonso et al. (1987) verificou que a influência da sucção osmótica na variação de volume é muito reduzida, pelo que Fredlund (1978) e Alonso et al. (1987) afirmaram que a sucção matricial é a mais influente no comportamento tensão-deformação dos solos não saturados.

2.3.3. SUCÇÃO TOTAL

Surge, então, a expressão da sucção total que resulta da soma da sucção matricial (Ψ_m) com a sucção osmótica (Ψ_o):

$$\Psi_t = \Psi_m + \Psi_o \quad (7)$$

Finalmente, pode-se dizer que os problemas que envolvem solos não saturados são, normalmente, resultado de modificações ambientais. Estas mudanças, geralmente, afetam a sucção matricial, por isso as alterações da sucção osmótica são menos problemáticas e significativas. Na figura 5 é possível observar a importância da sucção matricial face à sucção osmótica

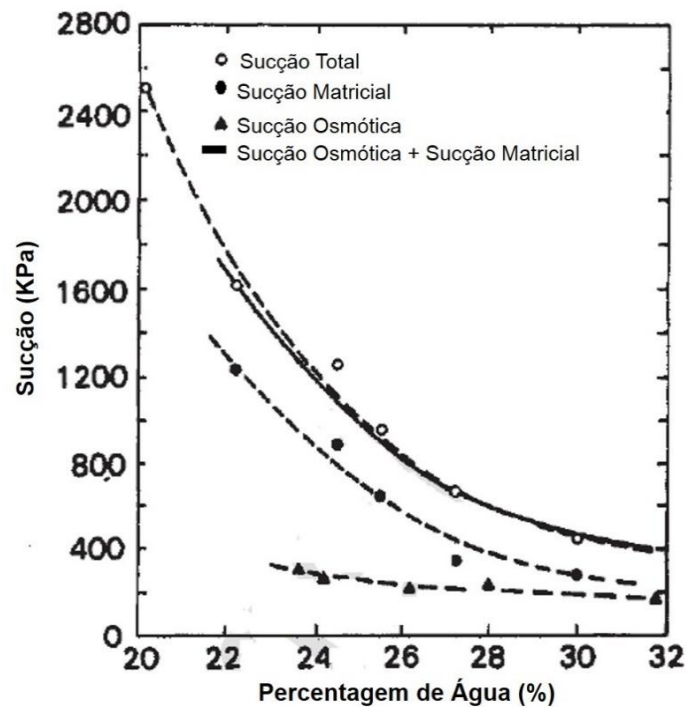


Figura 5 - Sucção Total, Matricial e Osmótica medidas numa argila compactada num terreno glacial (adaptado de Fredlund, 1993)

Como é possível observar na figura anterior, a sucção matricial mostra-se com uma importância maior comparativamente à sucção osmótica. A curva da sucção matricial encontra-se substancialmente acima da curva da sucção osmótica, daí a sua maior relevância ao nível da sucção total.

De forma a estudar os solos parcialmente saturados (ou solos não saturados), é preciso ter em atenção, para além dos princípios mecânicos e hidráulicos, os princípios termodinâmicos. É com a ajuda da termodinâmica que é possível descrever o equilíbrio entre o gás e as fases sólida e líquida. Como referido anteriormente, a sucção está totalmente relacionada com as condições ambientais, nomeadamente com a humidade relativa, tema este que irá ser abordado no capítulo 2.4.2.

2.4. EFEITOS DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS

O clima tem um papel crucial na saturação dos solos, porque a quantidade de água nos solos depende das condições atmosféricas, uma vez que a água é expulsa dos solos por evaporação (ou evapotranspiração) e é introduzida nos solos por infiltração devido à precipitação. É a diferença entre a quantidade de água que é expulsa (fluxo ascendente) com a quantidade de água que entra (fluxo descendente) que determina o grau de saturação dos solos.

Desta forma, o ciclo hidrológico (figura 6) apresenta-se como um conceito fundamental para perceber o comportamento dos solos parcialmente saturados. Usualmente, os solos que se situam acima do nível freático apresentam pressões negativas da água dos poros. No entanto, quando ocorrem mudanças atmosféricas, nomeadamente precipitações, as pressões da água dos poros tendem a aumentar, aproximando-se de valores positivos, ou seja, nos períodos húmidos. Este aumento de pressões pode levar à diminuição do módulo resiliente, pelo que é importante controlar o comportamento mecânico dos solos não saturados e analisar a sua resistência e deformabilidade.

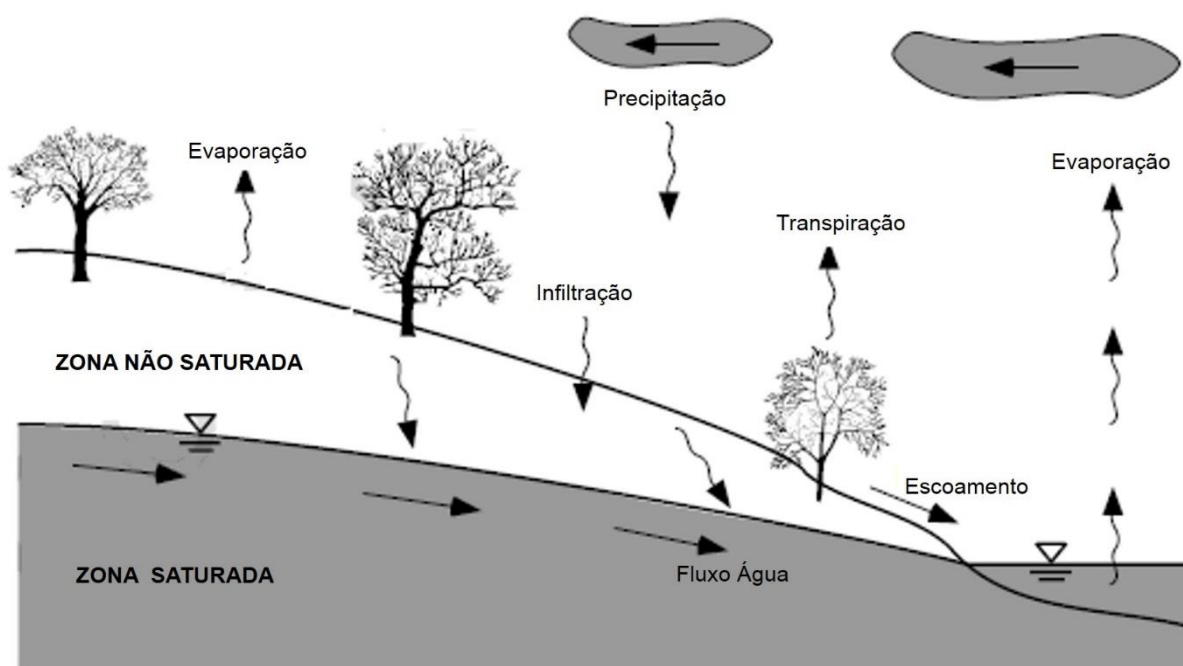


Figura 6 - Ciclo Hidrológico (adaptado de Lu, N. e Likos, W.,2004)

2.4.1. EFEITOS DA EVAPORAÇÃO E PRECIPITAÇÃO

Para provar que os fatores meteorológicos afetam diretamente a sucção e o teor em água dos solos, Mancuso et al. (2010), desenvolveram um modelo físico de forma a quantificar os fluxos de evaporação e a influência que estes têm sobre as variações do teor em água no solo e variações da sucção. O modelo é composto por um reservatório de 1m^3 , preenchido com solo piroclástico e exposto a elementos naturais. O solo foi obtido após a catástrofe em Sarno, no sul de Itália, em 1998.

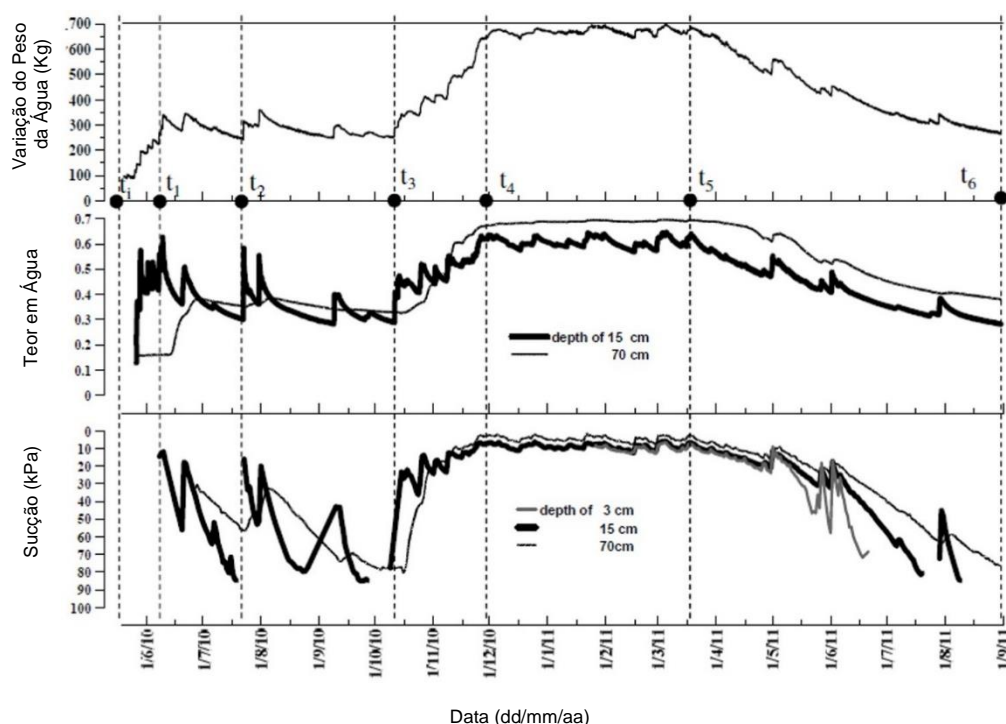


Figura 7- Evolução da variação do peso da água, teor em água para duas profundidades e sucção com o período de referência em três profundidades (adaptado de Mancuso, C., Jommi, Cristina e D'Onza, F., 2012)

Como se observa na figura 7, inicialmente a amostra foi molhada, induzindo um aumento de peso (t_0 - t_1). De t_1 a t_2 há uma flutuação do peso de 4 a 5 Kg por dia e o volume de água no solo e a sucção oscilaram significativamente a uma profundidade de 15 cm. No entanto, a 70 cm de profundidade, há uma tendência mais regular, resultado dos fenômenos de filtragem exercidos pelo solo. No período de t_2 a t_3 , verifica-se um decréscimo de todas as variáveis, devido a fenômenos de evaporação. O primeiro período molhado corresponde a uma variação de t_3 a t_4 . Devido a efeitos de precipitação intensa e persistente, o peso da amostra aumentou. É neste período que se obtém a máxima saturação da amostra. As condições quase saturadas fizeram com que o sistema, do ponto de vista hidráulico, dependa do movimento de pequenas quantidades de água. Ao contrário de outros períodos de tempo, a sucção e o teor de água oscilaram, simultaneamente, em pontos mais profundos e em pontos mais superficiais. Finalmente, no período t_5 , inicia-se um segundo período de seca, associada a perdas rápidas de água por evaporação. O peso diminuiu, assim como a quantidade de água enquanto a sucção aumenta.

Foram controladas constantemente as variáveis atmosféricas e, após um ano de monitorização, concluíram que a evaporação exerce uma influência significativa sobre a variação da sucção, como tal não pode ser negligenciada.

Bosscher et al. (2000), também estudaram a influência que o clima (nomeadamente precipitação e evaporação) tinham no balanço hídrico das barreiras capilares. Estes concluíram que o período crítico para a estabilidade dos solos é no Inverno, quando a evaporação é potencialmente baixa e a precipitação é mais frequente. Além disso, é nesta estação que há maiores quedas de neve e, consequentemente, maiores derretimentos que levam a infiltrações no solo. Hakonson et al. (1994), ilustraram a importância que o degelo tem nos solos parcialmente saturados.

2.4.2. EFEITOS DA HUMIDADE RELATIVA

Como já foi referido, a sucção está relacionada com as condições atmosféricas, nomeadamente a humidade relativa. A humidade relativa do ar traduz a quantidade de água contida no mesmo em equilíbrio com o ambiente. O teor de humidade do solo é dependente da humidade relativa do ar e estes estão, geralmente, em equilíbrio.

Desta forma, surge a expressão de Kelvin (Lu e Likos, 2004) que vem provar a relação da sucção com a humidade relativa do ar:

$$\Psi_t = - \frac{RT}{u_{w0}\omega_v} \ln(RH) \quad (8)$$

Sendo Ψ_t a sucção total, R contante universal do gás (8,14 J/mol K), T a temperatura absoluta expressa em graus Kelvin, ω_v a massa molecular do vapor de água (18,016 kg/kmol), u_{w0} o volume de água específico (m³/kg) e RH a humidade relativa do meio.

A seguir é apresentada uma figura que representa a relação da humidade relativa com a sucção total para uma temperatura de 293,16 K.

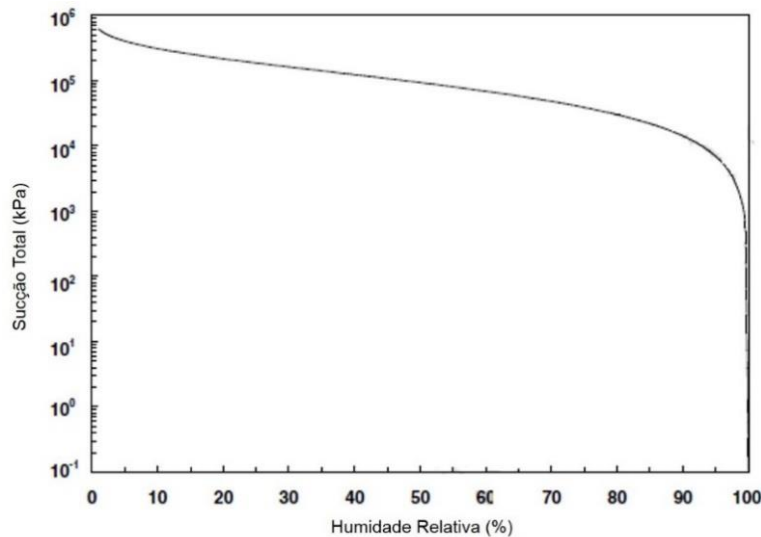


Figura 8 - Relação da Sucção Total com a Humidade Relativa a uma temperatura de 293.16 K (adaptado de Lu e Likos, 2004)

O teor em água, temperatura e humidade são dos aspetos mais relevantes no estudo dos solos não saturados. Segundo Lu e Likos, (2004) foram realizadas pesquisas que concluíram que a humidade e a temperatura provocam diferentes efeitos em diferentes alturas do ano. Por exemplo, se o período de temperatura máxima coincidir com o período de maior humidade, então os efeitos que a combinação destes dois parâmetros irão provocar no solo (nomeadamente em aterros) são agravados. Todavia, se o período de temperatura máxima coincidir com o período de humidade mínima, então os seus efeitos podem anular-se.

2.5. CURVA DE SUCÇÃO

A curva de sucção, também conhecida como curva de retenção ou curva característica do solo-água (SWCC – Soil-Water Characteristic Curve), é um parâmetro muito utilizado para representar o comportamento dos solos não saturados e permite avaliar a capacidade de retenção de água pelo solo. Esta relaciona a sucção total de um solo com o seu grau de saturação. Esta curva apresenta diferentes características devido ao esqueleto sólido das partículas (nomeadamente contacto das partículas), entrada de ar e variações volumétricas. Usualmente, a SWCC surge como função semi-logarítmica, onde a quantidade de água do solo aparece em escala linear e a sucção em escala logarítmica.

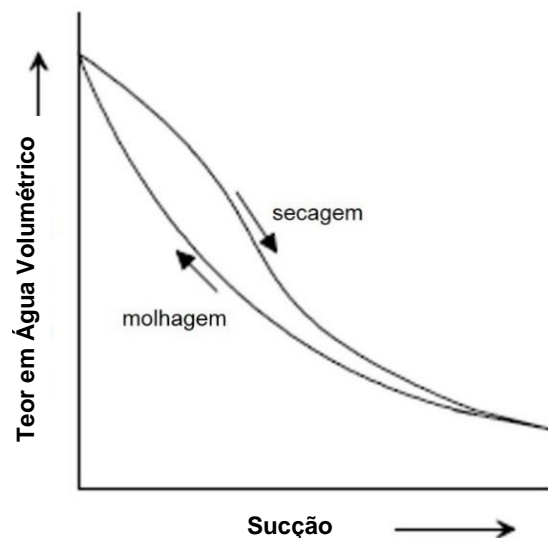


Figura 9 - Curva Característica Teórica de um solo não saturado (adaptado de Lu e Likos, 2004)

Esta curva é, sem dúvida, uma ferramenta essencial quando se está a abordar solos não saturados, pois desempenha um papel relevante na descrição da natureza e comportamento hidráulico e mecânico dos solos. Fornece informações acerca do comportamento hidro-mecânico do solo e facilita a abordagem das diferentes propriedades do solo, como a condutividade térmica, condutividade hidráulica, resistência ao corte e variação volumétrica.

É possível obter a SWCC através de vários métodos, como o método do papel de filtro, placas de sucção e de pressão e psicómetros. Feuerharmel et al. (2006) desenvolveu uma técnica recente para obter a curva de saturação através de centrifugadoras. Para além destes métodos, pode-se recorrer a ensaios laboratoriais como ensaios triaxiais.

Existem, ainda, vários modelos estudados por inúmeros autores para representar a curva de retenção, nomeadamente Gardner (1958), van Genuchten (1980), Mualem (1976), Burdine (1952) e Fredlund e Xing (1994), estando descritas na tabela 1. As propostas de Burdine e Mualem são equações de dois parâmetros para situações especiais enquanto a de van Genuchten é uma equação mais genérica e de três parâmetros. Estas equações apresentam assíntotas com orientação horizontal quer para a gama de valores associados a uma baixa sucção quer para os valores de sucção que ultrapassem os valores residuais, o que implica que, mesmo para valores extremos, não seja possível obter o valor de zero para o teor de água. Mais tarde Fredlund e Xing (1994) tiveram em consideração essa correção, propondo um modelo matemático no qual o fator corretivo impõe a condição de zero no teor de água para uma sucção de 1.000.000 kPa. Em todos

os casos, o parâmetro “a” representa a relação da entrada de ar no solo o que se reflete no ponto de inflexão da curva. O parâmetro “n” corresponde ao declive da parte linear principal da figura 9 (em secagem ou molhagem) da curva característica do solo e o parâmetro “m” é função do grau de água residual contida no solo (adaptado de Ng e Menzies, 2007).

É de salientar que neste trabalho irá ser utilizado o modelo de van Genuchten (1980) de forma a se obter as curvas de retenção dos materiais utilizados posteriormente.

Tabela 1 - Equações propostas por alguns autores para a definição da curva de retenção (adaptado de Fredlund, 2000)

Autor (Ano)	Equação	Parâmetros do Solo
Gardner (1958)	$w = \frac{w_s}{1 + \left(\frac{\psi}{a_g}\right)^{n_g}}$	a_g, n_g
van Genuchten (1980)	$w = \frac{w_s}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a_{vg}}\right)^{n_{vg}}\right]^{m_{vg}}}$	a_{vg}, n_{vg}, m_{vg}
Maulem (1976)	$w = \frac{w_s}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a_m}\right)^{n_m}\right]^{m_m}}$	$a_m, n_m, m_m = \frac{1}{1 - n_m}$
Burdine (1952)	$w = \frac{w_s}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a_b}\right)^{n_b}\right]^{m_b}}$	$a_b, n_b, m_b = \frac{2}{1 - n_b}$
Fredlund and Xing (1994)	$w = C(\psi) \frac{w_s}{\left[\ln(e + \left(\frac{\psi}{a_f}\right)^{n_f})\right]^{m_f}}$	$a_f, n_f, m_f, C(\psi)$

2.6. FLUXO DE ÁGUA E AR

Das três (ou quatro) fases que constituem um solo não saturado, duas delas podem ser consideradas como um fluido: água e ar. A análise do fluxo de um fluido requer uma lei que relacione a velocidade do fluxo com um potencial de condução. A forma da lei de fluxo pode variar segundo três casos: quando o grau de saturação é muito elevado, o ar presente no solo não saturado está ocluído; quando o grau de saturação é relativamente baixo, a fase do ar apresenta-se de uma forma contínua; quando o ar pode simplesmente circular para a fase da água, o que é chamada a difusão do ar.

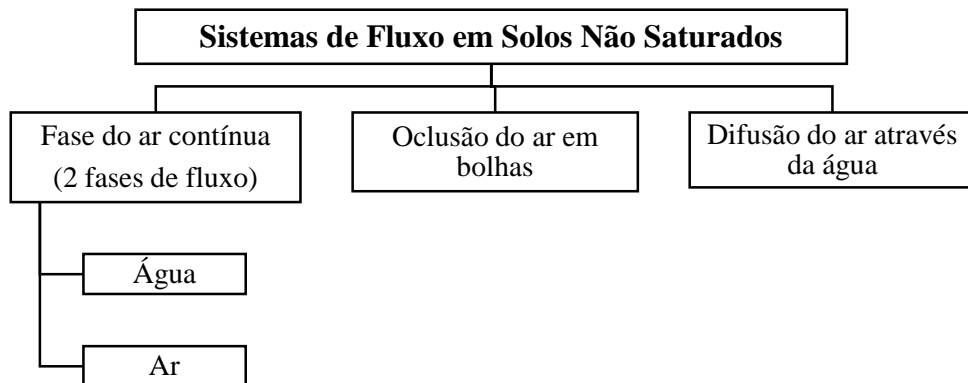


Figura 10 - Tipos de fluxo comuns em solos não saturados

2.6.1. FLUXO DE ÁGUA

Usualmente, supõe-se que a água flui de um ponto com elevado teor em água para um ponto com reduzido teor em água. No entanto, esta teoria não é verdadeira, pois a água também pode circular de uma região com baixo teor em água para uma região com elevado teor em água.

Darcy, em 1856, define o fluxo de água de um solo saturado segundo um gradiente hidráulico.

$$v_w = -k_w \frac{dh_w}{dy} \quad (9)$$

Sendo v_w a taxa de fluxo de água, k_w o coeficiente de permeabilidade para a fase da água e $\frac{dh_w}{dy}$ o gradiente hidráulico (também designado como i_{wy}).

Segundo Buckingham (1907), Richard (1931) e Childs e Collis-George (1950), a lei de Darcy pode ser aplicada a solos não saturados. Neste caso, o coeficiente de permeabilidade não é constante, mas é uma variável que depende do teor em água ou da sucção matricial. A validade da lei de Darcy para solos não saturados apenas se verifica para volume de água constante e gradiente hidráulico variável.

2.6.2. FLUXO DE AR

A fase do ar de um solo não saturado pode ser apresentada de duas formas: oclusão do ar em bolhas ou ar de uma forma contínua. Segundo Corey (1957), o ar encontra-se numa forma contínua quando o grau de saturação é inferior a 85%. Segundo Matyas (1967), quando o grau de saturação é superior a 90%, a fase do ar encontra-se oclusa e o fluxo de ar começa a difundir-se na fase da água (difusão). O fluxo de ar pode ser causado por:

- Variação da pressão barométrica;
- Infiltração da água pela chuva que comprime o ar nos poros do solo;
- Alterações da temperatura;
- Cargas aplicadas (quando se trata de aterros compactados).

De forma a expressar o fluxo de ar em meios porosos, Fick (1855), desenvolveu uma lei que descreve a difusão do ar através da água.

$$J_a = -D_a \frac{dC}{dy} \quad (10)$$

Sendo J_a a taxa de ar que flui através de uma unidade de solo, D_a uma constante de transmissão de fluxo de ar através do solo, C a concentração de ar e $\frac{dC}{dy}$ o gradiente de concentração segundo a direção y .

Substituindo D_a por D_a^* que é função das propriedades de volume e massa do solo, a expressão 10 torna-se na expressão 11, que expressa a lei de Fick, usada para caraterizar o fluxo de ar através do solo:

$$J_a = -D_a^* \frac{du_a}{dy} \quad (11)$$

Sendo D_a^* expresso pela equação 12:

$$D_a^* = D_a \frac{d[\rho_a(1-S_r)n]}{du_a} \quad (12)$$

Sendo u_a a pressão do ar dos poros, $\frac{du_a}{dy}$ o gradiente da pressão do ar dos poros na direção y , ρ_a a pressão absoluta do ar e S_r o grau de saturação.

É, ainda, de salientar que tanto a lei de Fick como a lei de Darcy podem representar o fluxo de ar em solos não saturados.

3

PLATAFORMAS FERROVIÁRIAS

3.1. INTRODUÇÃO

De forma a enquadrar o estudo desenvolvido nesta tese, é de todo o interesse conhecer a constituição e características gerais de uma estrutura ferroviária, permitindo uma melhor compreensão do tema e a sua relação com as obras de aterro. É, também, de todo relevante, apresentar um pouco o sistema de via em laje possível de ser utilizado ao invés de se usar a corrente via sobre balastro. Para além disso, e como um dos objetivos é verificar se os enrocamentos trazem ou não vantagens para estas infraestruturas, também se irá desenvolver um subcapítulo em torno deste assunto. Finalmente, vai-se fazer uma referência aos assentamentos em obras de aterros.

Antes de mais, é de referir que as vias férreas, segundo Fortunato (2005), têm como função proporcionar uma circulação ferroviária segura, económica e confortável. De forma a prever o comportamento desta, é necessário quantificar a importância que cada um dos elementos, que a compõe, tem sobre a mesma.

3.2. INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA

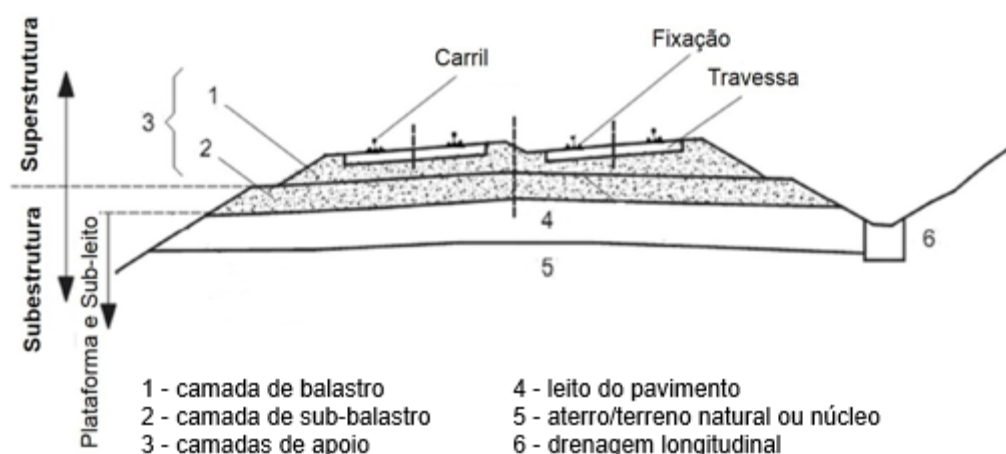


Figura 11 - Corte de uma infraestrutura ferroviária

3.2.1. CAMADAS DE APOIO

As camadas de apoio são constituídas pela camada de balastro e sub-balastro e, como tal, devido à sua espessura, estas camadas desempenham um papel importante no que toca a deformações e rigidez. A espessura destas camadas depende de inúmeros fatores, nomeadamente, tráfego que irá passar por esta via, condições atmosféricas, condições geológicas e hidrogeológicas do local e geometria da própria plataforma.

3.2.1.1. BALASTRO

O balastro é uma camada que pertence à superestrutura. Normalmente é constituída por rocha britada. As principais funções desta são a degradação das pressões com origem nas travessas e transmissão das mesmas às camadas inferiores. Desta forma, é garantida a estabilidade e resistências às ações verticais e aos deslocamentos. Para além disso, tem ainda como funções o escoamento das águas pluviais, amortecimento das vibrações e diminuição dos efeitos indesejados nas camadas subjacentes devido a ações atmosféricas.

3.2.1.2. SUB-BALASTRO

O sub-balastro pertence à subestrutura, apesar de alguns países o considerarem como parte da superestrutura. Segundo Fortunato (2005), esta camada também pode estar dividida em várias subcamadas, dependendo o seu número das características do material constituinte, das propriedades do solo de fundação e do tráfego. O material que constitui o sub-balastro é, normalmente, bem graduado e resistente ao desgaste, tendo propriedades de filtração e separação. As funções desta camada são a redução da transmissão das tensões às camadas subjacentes e impedimento do desgaste da fundação devido às ações mecânicas. Para além disso, protege contra as ações do gelo/degelo e evita infiltrações de água no solo de fundação.

3.2.2. ATERRO

3.2.2.1. PLATAFORMA E PARTE SUPERIOR DO ATERRO

A parte superior do aterro é a camada onde o sub-balastro assenta. A plataforma é a parte que assenta sobre a parte superior do aterro.

3.2.2.2. LEITO DO PAVIMENTO E NÚCLEO

A parte superior do sub-leito é formada pelo leito do pavimento que, usualmente, apresenta uma inclinação. As principais funções desta camada são proteger as camadas inferiores durante o período de construção e período de vida da obra e proteger contra geadas. Esta camada apresenta 0,60m de espessura e é normalmente constituída pelo material de melhor qualidade. O núcleo, geralmente, é constituído por um material mecanicamente não tão competente como o descrito anteriormente.

3.2.2.3. DRENAGEM LONGITUDINAL

A drenagem longitudinal coleta e descarrega as águas superficiais, subterrâneas e de infiltração. Faz-se, ainda, distinção entre valas laterais e drenos enterrados.

3.3. VIA EM LAJE

Como os aterros para linhas férreas de alta velocidade que irão ser tratados nesta tese utilizam o sistema construtivo de via em laje, é importante fazer uma breve explicação deste tipo de construção. O sistema de via em laje é uma alternativa construtiva às vias que assentam sobre o balastro. Um dos principais inconvenientes das vias férreas que assentam sobre o balastro é o facto de requererem uma elevada manutenção que tende a ser crescente com o aumento da frequência e velocidade do tráfego.

Assim, como nos últimos anos se tem construído linhas férreas de alta velocidade, surgiu a necessidade de se adotar um novo sistema de construção de forma a melhorar a qualidade das vias e reduzir os custos de manutenção. Apareceu por volta dos anos 60, na Europa Central, o sistema de via em laje que permite resolver problemas de manutenção.

3.3.1. DESCRIÇÃO E PROCEDIMENTOS CONSTRUTIVOS

A via em laje é constituída por uma camada superficial de betão ou betuminoso. Um dos principais objetivos desta laje é conseguir uma elevada precisão da via e, para tal, existem duas formas de construção: “bottom-up” e “top-down”.

A metodologia “bottom-up” consiste em construir primeiro a laje, fixando-se, posteriormente, a esta os carris e as travessas. Neste tipo de construção, cada uma das camadas deve ser muito cuidadosamente controlada e a posição final e alinhamento do carril é realizada de forma muito precisa.

A metodologia “top-down” começa por utilizar elementos temporários para primeiro se construir a via (carris e travessas) e passando depois a betonar-se a laje por baixo daqueles elementos de forma a completar o trabalho. Este sistema construtivo é mais rigoroso e preciso que o anterior.

3.3.2. VIA SOBRE BALASTRO VS. VIA EM LAJE



Figura 12 - Sistemas construtivos de linhas férreas a) via sobre balastro b) via em laje

Vantagens Via em laje (Michas, 2012):

- Menor manutenção durante o período de vida útil;
- Maior estabilidade estrutural com uma maior segurança face às forças laterais e cargas por eixo;
- Menor altura da estrutura o que pode ser benéfico em caso de túneis;
- Bom design para alta velocidade garantindo um bom comportamento para velocidades até 300Km/h;
- Redução dos custos de controlo da vegetação;
- Alguns tipos de plataformas em laje permitem a circulação de outros veículos, nomeadamente veículos de emergência.

Desvantagens Via em laje (Michas, 2012):

- Maiores níveis de ruído e vibrações emitidos, requerendo a colocação de sistemas de absorção de vibrações;
- Após a via estar construída há opções limitadas de reajuste da mesma;
- Exigência de uma grande precisão durante a construção;
- Maior período de construção;
- Em todos os tipos de via em laje é necessário colocar uma camada de proteção contra geadas cuja espessura é superior à requerida nas vias que assentam sobre o balastro implicando então um maior investimento na subestrutura;
- Necessidade de utilizar material de regularização.

Vantagens Via sobre o Balastro (Michas, 2012):

- Baixo custo de construção;
- Elevada elasticidade proporcionada pelo balastro;
- Grande absorção de ruídos proporcionada pelo balastro;
- Possibilidade de modificar a geometria da via;
- Aproximadamente cerca de 150 anos de experiência.

Desvantagens Via sobre o Balastro (Michas, 2012):

- Não possuem boa resistência lateral e longitudinal;
- A estrutura tem uma maior espessura e é mais pesada que a via com via em laje;
- Perigo de voo do balastro para altas velocidades;
- A deterioração do leito faz com que seja necessária a realização de operações de manutenção mais frequentes, levando a custos de manutenção superiores.

3.3.2.1 COMPARAÇÃO DE CUSTOS

Como se pode observar na figura seguinte, apesar de todos os avanços preconizados, os custos de construção com via em laje permanecem elevados, daí que muitos países optem por apenas usar este sistema de construção em linhas férreas de alta velocidade. No entanto, os elevados custos de manutenção das vias que assentam diretamente no balastro e a necessidade de disponibilidade de via faz com que, cada vez mais, se utilize o sistema de via em laje.

É importante que, quando se decide o tipo de sistema a utilizar, se tenha em conta não apenas os custos de construção, mas também os custos de manutenção ao longo do período de vida da obra.

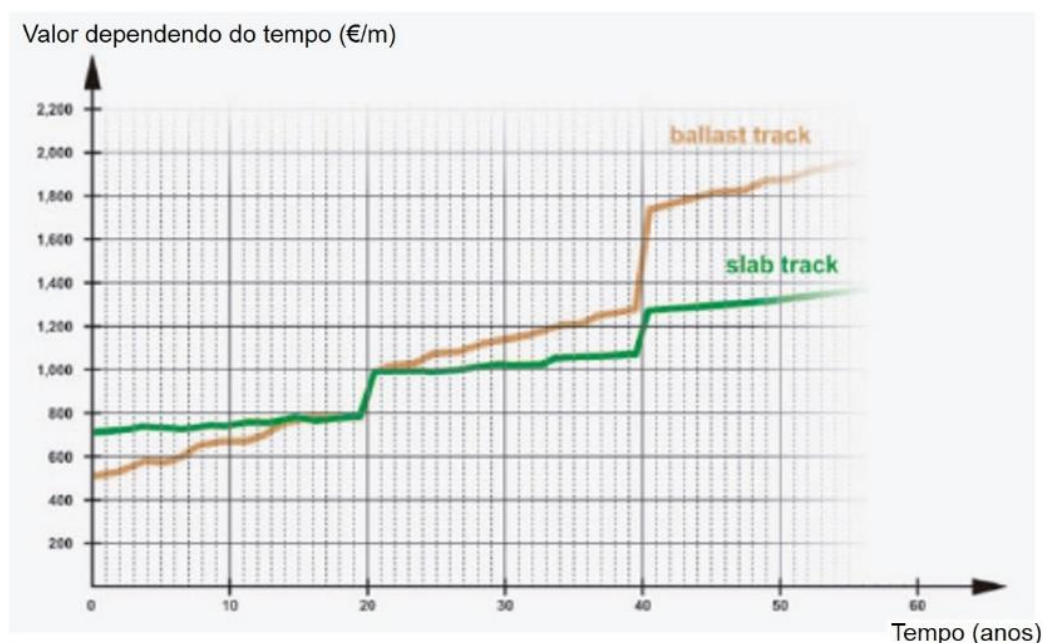


Figura 13 - Comparação do valor em € por metro de via-ferrea consoante seja em via em laje ou via assente sobre balastro, (Schilder y Diederich, 2007)

3.3. ASSENTAMENTOS EM ESTRUTURAS FERROVIÁRIAS

As estruturas ferroviárias são compostas por vários tramos, nomeadamente viadutos, pontes, túneis e aterros. Os aterros são as secções que podem sofrer mais assentamentos pois estes podem experimentar:

- Assentamentos no corpo do aterro que podem ser devidos ao peso próprio e a erros durante a construção, nomeadamente uma insuficiente compactação;
- Assentamentos durante o tempo de vida da obra devido ao tráfego constante;
- Assentamentos na fundação, ou seja, no terreno que suporta o aterro que são essencialmente devidos à expulsão de água intersticial.

As imagens seguintes representam os assentamentos experimentados pelos aterros: (imagem retirada do documento da “International Union of Railways”, UIC 2008).

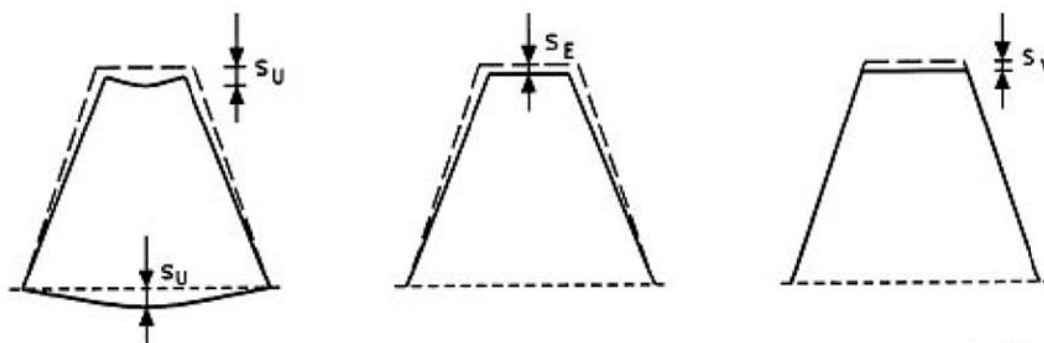


Figura 14 - Assentamentos experimentados no aterro (UIC, 2008)

Sendo s_U o assentamento da fundação, ou seja, do terreno natural, s_E o assentamento do aterro e s_V o assentamento devido à carga transmitida pelo tráfego.

Na imagem seguinte, pode-se visualizar a possível evolução temporal dos assentamentos experimentados numa obra ferroviária. O eixo das abcissas está em função do tempo enquanto o eixo das ordenadas representa o assentamento. No eixo do tempo, estão marcados t_0 que representa o início da construção, t_D o fim da construção do aterro, t_L o fim da construção da plataforma e t_B representa a colocação da estrutura em serviço.

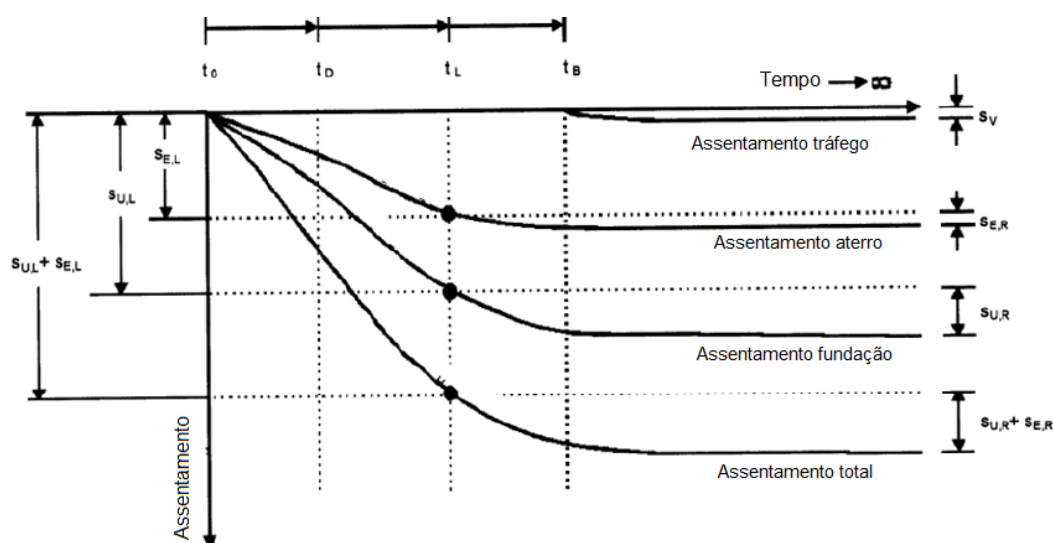


Figura 15 – Evolução dos assentamentos com o tempo (UIC, 2008)

3.4. USO DE MATERIAL DE ENROCAMENTO NO SOLO DE FUNDAÇÃO

Por vezes, é necessário melhorar o solo de fundação do aterro e, para tal, existem inúmeras técnicas de melhoramento e/ou substituição deste solo.

Como as condições atmosféricas ao longo do tempo provocam a degradação relativamente rápida do solo que pode funcionar como uma barreira hidráulica, é necessário colocar um tipo de drenagem, nomeadamente geomembranas, para garantir que este não seja desgastado devido aos efeitos atmosféricos. Este desgaste pode ser devido a várias condições, por exemplo, erosão dos

materiais do solo através do vento, arrastamento de finos por percolação devido à precipitação ou degelo e variações de temperatura que provocam variações do teor de humidade do solo. Uma outra forma de reduzir este risco, é utilizar, no solo de fundação dos aterros, material de enrocamento, ou pedrapleno, sendo esta uma técnica de substituição. Assim, consegue-se apoiar a plataforma ferroviária num solo mais competente. O material de enrocamento tem uma elevada permeabilidade e funciona como barreira capilar que desvia os fluxos de água. O contraste das propriedades hidráulicas entre o material de enrocamento e o material situado no núcleo do aterro é de tal forma elevado que restringe o movimento da água através da interface entre estas camadas e faz com que se evitem movimentos de ascensão capilar. Assim, estas barreiras capilares isolam os materiais situados acima do pedrapleno da água oriunda da ascensão capilar.

3.4.1 PROCEDIMENTO CONSTRUTIVO

A substituição de solos é um método bastante simples. Inicia-se pela escavação do solo com características mecânicas mais pobres, substituindo-o por um material mais competente. A escavação do material pode ser realizada através do uso de escavadoras convencionais, giratórias, scraper, entre outras.

Antes de se iniciar a escavação, é necessário definir as zonas de onde se deve retirar o mesmo. Rollings y Rollings (1996) apresentou diferentes soluções de desenho para remoção do material mais fraco e, conseqüentemente, a sua substituição:

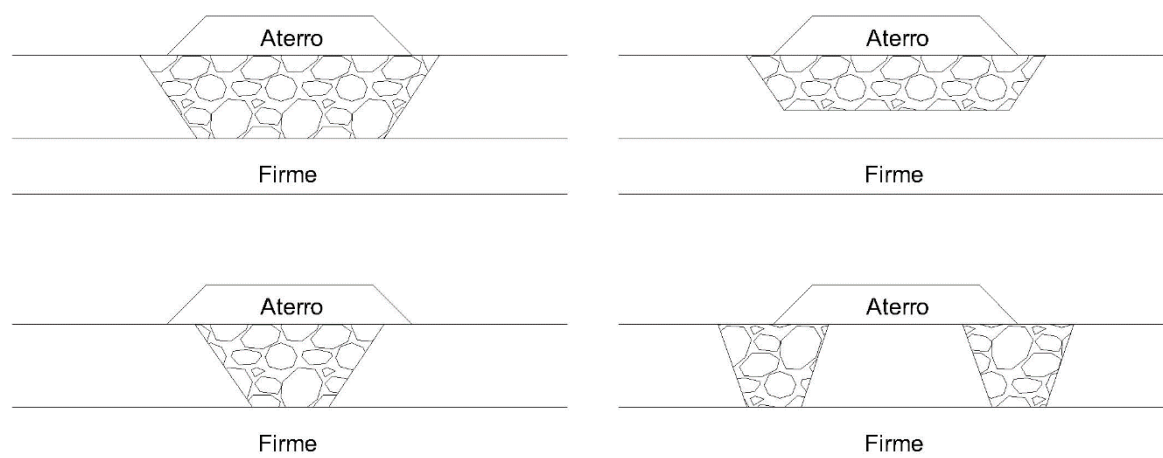


Figura 16 - Diferentes soluções de desenho da técnica de substituição propostas por Rollings y Rollings (1996)

Esta é uma técnica vantajosa devido à sua simplicidade, facilidade de maquinaria e, no geral, é um método viável. No entanto, por vezes, esta pode acarretar custos superiores a outras técnicas de melhoramento do solo porque, para além dos custos associados ao transporte e armazenamento deste material, é necessário drenar toda a zona pois esta técnica implica que o nível freático se encontre abaixo da zona de trabalhos.

4

MODELAÇÃO NUMÉRICA

4.1. INTRODUÇÃO

O objetivo principal desta tese é realizar duas análises: análise hidrotérmica e análise mecânica. Numa primeira fase, ir-se-á fazer a análise hidrotérmica (TH) onde se irá verificar os efeitos das condições atmosféricas nos aterros para estruturas ferroviárias ao nível do grau de saturação, sucção e temperatura. De seguida, procede-se a uma análise mecânica para verificar os assentamentos a que estes aterros estão sujeitos devido às alterações atmosféricas.

4.2. PROGRAMA COMPUTACIONAL: *CODE_BRIGHT* E *GiD*

O programa utilizado para realizar a análise termohidráulica focada anteriormente é o *Code_Bright*. Este foi desenvolvido por Olivella et al, (1996) no Departamento de Engenharia do Terreno, Cartografia e Geofísica da Universidade Politécnica da Catalunha (UPC). É um código que utiliza o Método dos Elementos Finitos e que permite realizar análises Termo-Hidro-Mecânicas (THM) ou de forma acoplada ou separadamente. *Code_Bright* significa *Coupled Deformation, Brine, Gas and Heat Transport* é uma ferramenta desenvolvida para lidar com problemas acoplados em meios geológicos sujeitos a condições térmicas, hidráulicas e mecânicas.

Apesar do código utilizado para fazer as diferentes análises ser o *Code_Bright* v.4.4, também se irá utilizar o *GiD* 11.0.6 que é um programa de pré e pós processamento de dados. Tal como o *Code_Bright*, o *GiD* foi desenvolvido na UPC pelo Centro Internacional para Métodos Numéricos em Engenharia. Este permite definir a geometria e introduzir os inputs necessários para a correta definição do problema. É, ainda, através do *GiD* que é possível observar os resultados obtidos após o cálculo ter sido realizado.

Muito simplificada e sucintamente, começa-se por definir a geometria e os materiais do problema, escolhe-se o tipo de análise a realizar (TH), define-se as condições de fronteira, gera-se a malha e faz-se o refinamento necessário. Seguidamente faz-se o cálculo através do *Code_Bright* e visualiza-se os resultados através do *GiD* em forma de figuras, campos vetoriais, contornos entre outros.

4.2.1. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO *CODE_BRIGHT*

Como os solos são constituídos por partículas sólidas, água e ar, estes são governados por aspetos hidráulicos, térmicos e mecânicos. O problema que se irá desenvolver considera que o meio é poroso constituído por grãos sólidos, água e ar. Assim, a sua constituição tem três partes: sólida (s), constituída por minerais; líquida (l), por água e ar dissolvido; e gasosa (g), constituída por uma mistura de ar e vapor de água.

É também relevante focar os pressupostos e aspetos que são tidos em consideração na formulação de problemas neste programa, nomeadamente: (adaptado de *Code_Bright User's Guide, June 2013, UPC*)

- Como o ar seco é considerado uma única espécie e é o elemento principal constituinte da fase gasosa, a lei de Henry expressa o equilíbrio do ar dissolvido;
- Como se assume que existe equilíbrio térmico, considera-se que a fase sólida, líquida e gasosa estão à mesma temperatura;
- A concentração de vapor está em equilíbrio com a fase líquida e a lei psicométrica expressa a sua concentração;
- As variáveis de estado (ou incógnitas) são deslocamentos (u) nas três direções, pressão líquida (P_l), pressão gás (P_g) e temperatura (T);

É importante referir as leis e equações (tabela 2) sob as quais este programa funciona:

Tabela 2 - Equações e Leis que regem o programa *Code_Bright* (*Code_Bright User's Guide, 2013*)

Equações de Balanço	Variáveis
Balanço de massa de água	
Balanço de massa de ar	
Balanço da energia interna do meio	
Equações Constitutivas	Variáveis
Lei de Darcy (ver capítulo 2.6.1 e 2.6.2)	Descreve o fluxo de um fluido através de um meio poroso (o fluxo é controlado por gradientes de pressão) - fluxo gasoso (q_g) e fluxo líquido (q_l)
Lei de Fick (ver capítulo 2.6.2)	A difusão do vapor e a transferência de vapor dissolvido estão controladas pelos respetivos gradientes de concentração de vapor e ar dissolvidos - Fluxo de vapor de água e de materiais solúveis (i_g^w e i_g^a)
Curva de Retenção	Descreve o grau de saturação da fase líquida controlada pela sucção - (S_b e S_g)
Lei de Fourier	O fluxo de calor está controlado pelos gradientes de temperatura - Fluxo de calor (i_c)
Restrições de Equilíbrio	Variáveis
Lei de Henry	Expresso o equilíbrio da massa de ar dissolvido controlado pela temperatura
Lei Psicométrica	Expresso o equilíbrio entre o potencial de água líquida em forma de vapor

4.3. GEOMETRIA E MALHA

4.3.1. GEOMETRIA

De maneira a acelerar o processo de cálculo, apenas se inseriu metade do aterro. É pela condição de simetria que se obteve um muito menor número de elementos e de nós, o que permitiu uma economia temporal através de uma redução significativa dos tempos de cálculo e computação de resultados.

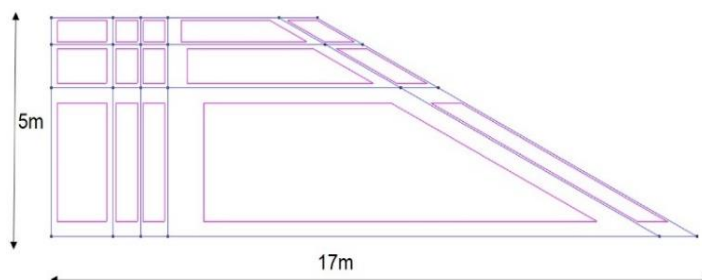


Figura 17 - Geometria do aterro

Considerou-se que a largura da plataforma ferroviária tem 14 m, pelo que apenas se irão inserir 7 m. O aterro a estudar tem 5 m de altura e 34 m de largura na base com uma inclinação de 2H/1V. Optou-se por uma altura de 5 m uma vez que os estudos elaborados pelo CIMNE foram feitos em aterros com 10 m e, desta forma, pode-se analisar também em que medida é que a altura pode influenciar os resultados do cálculo. A inclinação adotada está em concordância com o indicado nas *Instrucciones y Recomendaciones para la Redacción de Proyectos de Plataforma* editadas pela ADIF (2011b).

Este está dividido em três camadas: leito do pavimento (camada superior) com 0,60m, parte superior do aterro (camada média) com 1m e núcleo (camada inferior) com 3,4m. A espessura do leito do pavimento segue a prática adotada na LAV (Linhas Alta Velocidade) da rede Espanhola que diz que a espessura desta camada pode ter até 60 centímetros, dependendo das propriedades do material sobre o qual repousa. Adotou-se o valor máximo em todos os casos estudados. Relativamente à espessura da parte superior do aterro, esta segue o especificado em “*Pliego de Prescripciones Técnicas Tipo para los Proyectos de Plataforma*” editado pela Administração de Infraestruturas Ferroviárias (2012).

4.3.2. MALHA

Segundo Oñate (2009), a criação da malha é uma das peças mais importantes quando se utiliza o método dos elementos finitos. O programa utilizado (*GiD*) permite gerar malhas de modo expedito. Relativamente à malha gerada, fez-se a opção por um maior refinamento nas fronteiras superior e lateral, pois é nestas zonas onde é necessário um maior detalhe do cálculo. É, também, aqui que as condições atmosféricas (temperatura, humidade relativa e precipitação) têm maior influência, uma vez que estão em contacto direto com o aterro. Esta é uma malha constituída por 704 elementos quadriláteros e 759 nós com um ponto de Gauss.

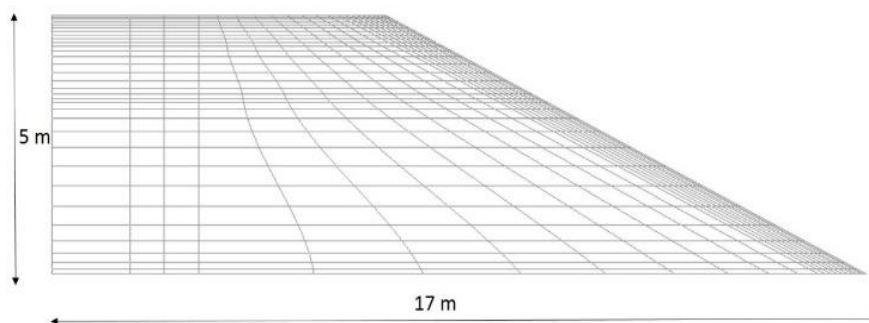


Figura 18 - Malha gerada

4.4. MATERIAIS

Os materiais utilizados para cada uma das camadas do aterro (leito do pavimento, parte superior do aterro e núcleo) estão descritos na tabela seguinte:

Tabela 3 - Características dos materiais de cada camada do aterro

		Leito do pavimento	PSA	Núcleo
Resistência e Deformabilidade	E (MPa)	50	50	13
	ν (-)	0,33	0,33	0,33
	Φ' (°)	33	33	30
	c' (kPa)	10	10	10
	Ψ (°)	0	0	0
Permeabilidade	K	2,5 E -4	2,1 E -4	2,0 E -9
Granulometria	#100 (%)	100	100	100
	#63 (%)	100	100	100
	#50 (%)	100	100	100
	#20 (%)	100	91	97,3
	#5 (%)	93	78	93,4
	#2 (%)	62	72	91,6
	#0,4 (%)	39	53	85,3
	#0,08 (%)	9	19	69,9
Plasticidade	LL (%)	NP	NP	37,6
	LP (%)	NP	NP	23
	IP (%)	NP	NP	14,6
Compactação com o Proctor Modificado	Gs (-)	2,65	2,65	2,65
	γ^{sat} (kN/m ³)	22,3	22,3	21,0
	γ^d (kN/m ³)	20	20	17,8

W_{opt} (%)	18,2	18,2	29,9
CBR (-)	25	25	5
Sr (%)	80,6	80,6	90,6
S (kPa)	20	50	150

As características dos materiais foram retiradas do documento Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Gran Capitán s/n. Módulo D-2, UNIVERSIDAD DE MÁLAGA. PROYECTO FASTRACK, Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, e resultam de ensaios laboratoriais elaborados pela CEMOSA (Centro de Estudios de Materiales y Control de Obra), em amostras obtidas através de empréstimos e pedreiras. A partir desses ensaios, obteve-se os dados de granulometria, plasticidade e os referentes à compactação (peso volúmico seco, teor em água ótimo e CBR). Todos os restantes parâmetros foram deduzidos a partir dos dados laboratoriais fornecidos. Como é possível observar no quadro anterior, os materiais pertencentes à leito do pavimento e parte superior do aterro são granulares, enquanto o material pertencente ao núcleo é o que se obteve a partir de uma argila miocénica, adicionando parte grossa, de forma a obter um material fictício com uma maior fração granular.

Na seguinte figura, apresentam-se as curvas granulométricas dos materiais utilizados em cada uma das camadas do aterro. Segundo o documento da ADIF (2012), tanto a granulometria como os valores da plasticidade dos diferentes materiais respeitam os valores normalizados de forma a considerar os materiais aptos para utilizar nas várias zonas do aterro. Também os valores respeitantes à compactação, obtidos através de Ensaio Proctor Modificado, satisfazem as prescrições estabelecidas pela ADIF.

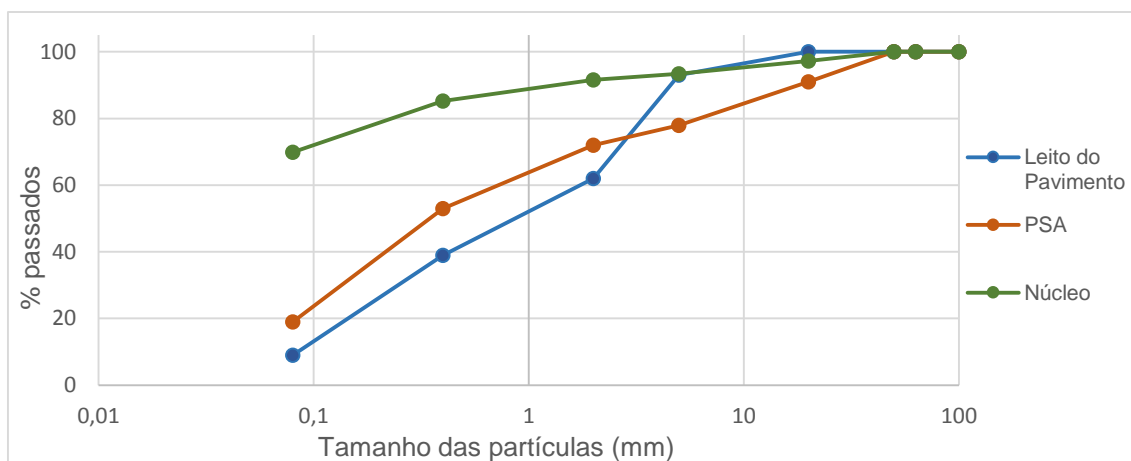


Figura 19 - Curvas Granulométricas dos vários materiais

Apenas os valores da sucção não foram obtidos através de ensaios laboratoriais. Utilizou-se a proposta de Ridley e Pérez-Romero (1998), que permite estimar aproximadamente um valor de sucção a partir da densidade máxima, teor em água ótimo e plasticidade de uma amostra compactada.

Relativamente ao ângulo de atrito proposto para os materiais granulares, são, pelo menos, conservadores. Quanto à coesão, esta é bastante moderada, associada ao estado de consolidação

e de saturação parcial inicial. Para o material de núcleo, adotar um valor de 30° , para o ângulo de atrito, pode ser considerado ligeiramente excessivo, no entanto o processo de compactação e, em particular, o estado de saturação inicial fornecem a estes materiais uma capacidade para resistir a tensões de corte, mantendo os seus parâmetros de resistência.

Quanto ao coeficiente de permeabilidade adotado para o núcleo, optou-se por considerar um valor elevado de forma a observar a influência que este parâmetro tem nos resultados obtidos. No que concerne aos materiais granulares (leito do pavimento e parte superior do aterro), adotaram-se valores de ordem de grandeza elevada de forma a contrastar com o material do núcleo.

Finalmente, relativamente às curvas de retenção de água, não se dispõe de ensaios laboratoriais que as determinem, pelo que se recorreu à proposta de van Genuchten (1980). Assim, a partir da expressão de Van Genuchten e das características dos materiais obtiveram-se as seguintes curvas de sucção:

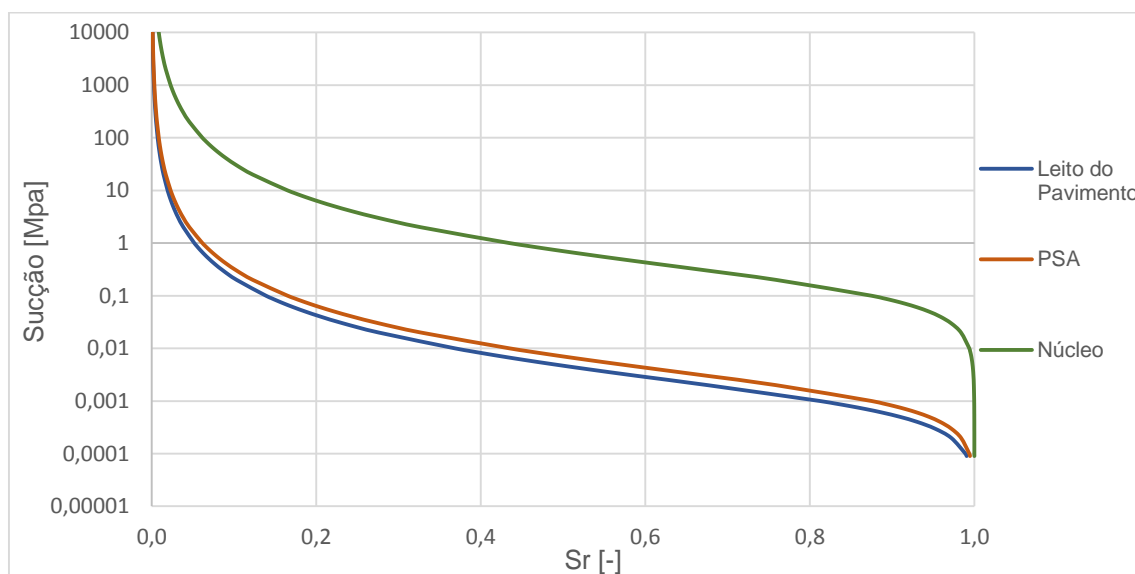


Figura 20 - Curvas de Retenção dos vários materiais

4.5. CLIMA

Antes de se apresentar o tipo de climas que foram considerados neste trabalho, é importante conhecer a classificação do mesmo segundo a proposta de Köppen (1936). Köppen realizou uma divisão em diferentes tipos de climas, tendo em conta a sazonalidade e os valores médios anuais e mensais da temperatura do ar e da precipitação. Na caracterização de Köppen, existe um código associado a cada tipo de clima, constituído por letras maiúsculas e minúsculas. Assim, existem cinco principais grupos de clima: tropical (A), árido (B), temperado (C), frio (D) e glacial (E).

O clima tropical é caracterizado por ter uma temperatura média do mês mais frio superior a 18°C .

No clima árido é usual haver uma precipitação anual reduzida (normalmente inferior a 500mm) e uma temperatura média razoavelmente elevada.

Relativamente ao clima temperado, é comum a temperatura média dos meses mais frios estar compreendida entre 0°C e 18°C , enquanto a temperatura média do mês mais quente é superior a 10°C . Este clima é típico da Península Ibérica, pelo que se irá dar uma especial importância.

O clima frio conta, geralmente, com uma temperatura média do mês mais frio inferior a 0°C e uma temperatura média do mês mais quente superior a 10°C . Pode-se notar este clima nas principais cordilheiras da Península Ibérica, como é o caso dos Pirenéus.

Finalmente, o clima glacial costuma ter uma temperatura média inferior a 10°C no mês mais quente. Como era de esperar, este tipo de clima não se visualiza na Península Ibérica.

Como referido atrás, o tipo de clima característico da Península Ibérica é o temperado (C). Dentro deste tipo de clima, existe aquele em que se observa um período muito seco no Verão (Cs) e no Inverno (Cw). Há, ainda, o clima sem estação seca (Cf). Para além disso, ainda se pode fazer distinção em função do Verão ser caloroso ou temperado, ou seja, a letra “a” corresponde a uma temperatura média do mês de maior calor, superior a 22°C , enquanto a letra “b” corresponde a uma temperatura média do mês de maior calor, inferior a 22°C . Neste trabalho, ir-se-á dar atenção aos climas de Antequera e San Sebastián, que têm um clima Csa e Cfb respetivamente. Na imagem seguinte pode-se observar o mapa da Península Ibérica segundo a classificação de Köppen. A azul está marcada a região de San Sebastián e a vermelho a região de Antequera.

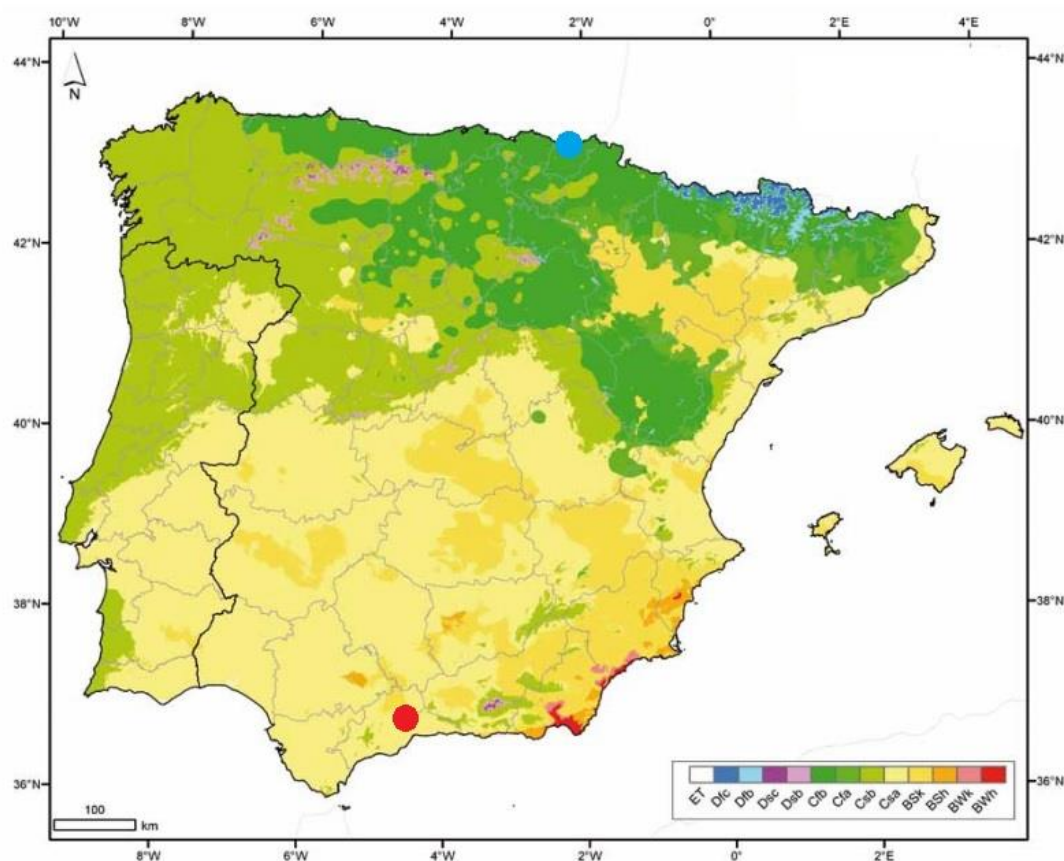


Figura 21 - Mapa Ibérico segundo a classificação atmosférica de Köppen (1936)

É, ainda, de referir que alguns dos dados meteorológicos utilizados para descrever o clima em ambas as regiões foram retirados do “Atlas Climático Ibérico”, publicado em 2011 pela Agência Estatal de Meteorologia e pelo Instituto Meteorológico de Portugal (IMP, 1936). Foram, também, fornecidos dados através do relatório da Universidade de Málaga.

4.5.1. CLIMA DE SAN SEBASTIÁN

San Sebastián é classificado como tendo um clima Cfb, ou seja, clima temperado onde não há uma estação claramente seca. Como esta região se apresenta com uma elevada humidade durante a maior parte do ano, provavelmente irá provocar um aumento do grau de saturação e de humidade dos materiais que constituem o núcleo, a parte superior do aterro e a leito do pavimento. No entanto, nesta região pode-se considerar uma temperatura média ao longo de todo o ano (13,5°C), variando entre 8,1°C para o mês de Fevereiro e 20,7°C para o mês de Agosto.

Os dados utilizados correspondem a um período de dez anos (2000 a 2009) os quais foram retirados do website do ECAD (European Climate Assessment & Dataset, <http://eca.knmi.nl/>). Estes foram observados na Estação Meteorológica de San Sebastián, pertencente à província de Guipúzcoa e cujo código é o 234.

De forma a estudar a interação entre a plataforma ferroviária e a atmosfera, dispõem-se todas as variáveis atmosféricas necessárias: valores diários de precipitação, humidade relativa, temperatura média, velocidade média do vento e radiação solar.

De seguida, são apresentados os dados mensais (precipitação - P, humidade relativa - HR e temperatura - T), correspondentes ao ano de 2004, uma vez que este pode ser considerado como representativo do clima médio no que se refere à precipitação média anual. De notar que as figuras relativos aos restantes anos estão em anexo.

Tabela 4 - Valores médios registados em San Sebastián para o ano de 2004

Mês	P (mm)	HR (%)	T (°C)
Janeiro	214	79	9,2
Fevereiro	96	76	8,1
Março	115	74	8,7
Abril	95	78	10,9
Maio	95	81	13,8
Junho	53	83	18,6
Julho	48	86	18,5
Agosto	134	78	20,7
Setembro	105	82	18,8
Outubro	177	74	16,6
Novembro	150	82	9,8
Dezembro	150	83	8,7
Ano: 2004	1432	80	13,5

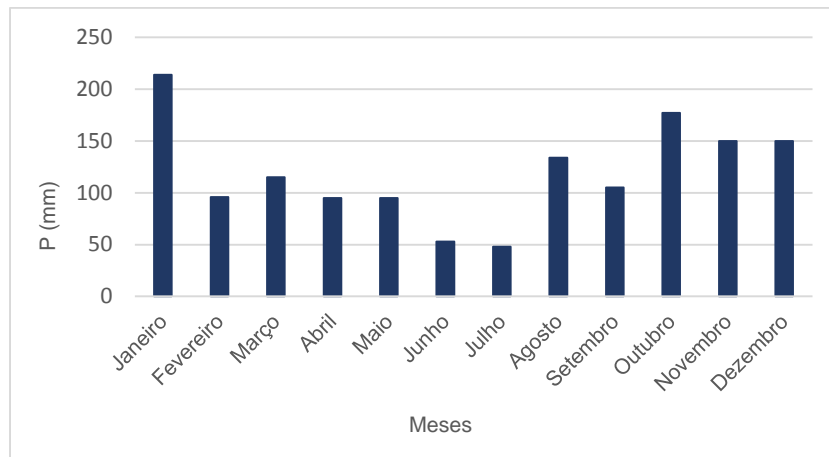


Figura 22 - Valores de precipitação em San Sebastián para o ano de 2004

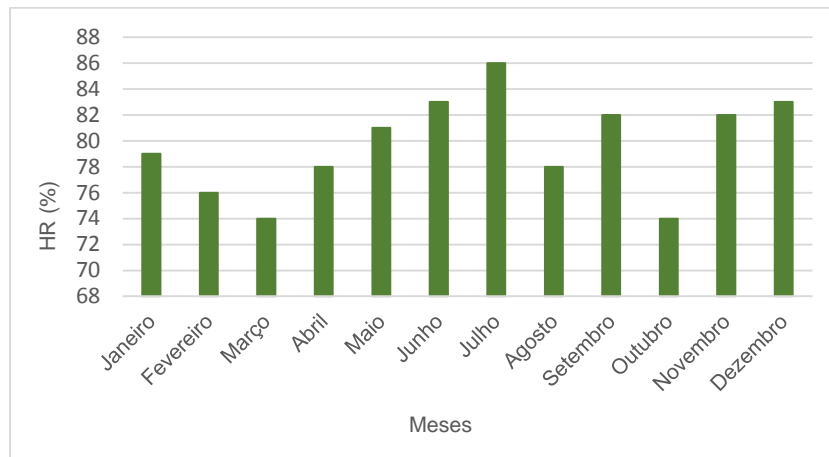


Figura 23 - Valores de humidade relativa média em San Sebastián para o ano de 2004

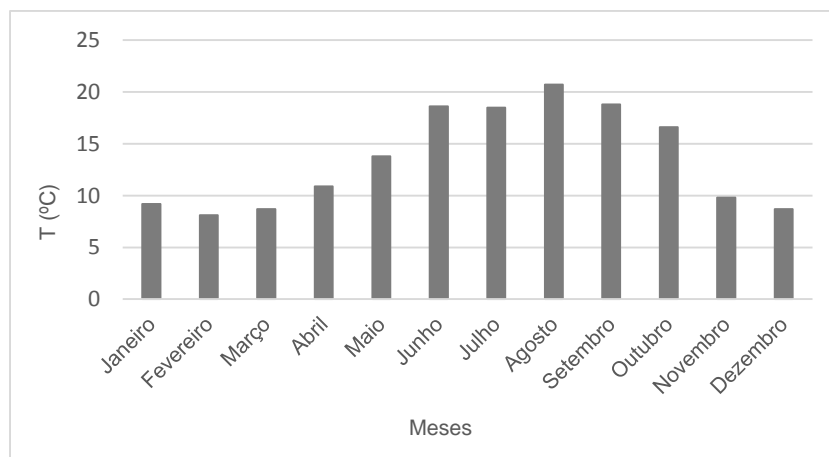


Figura 24 - Valores de temperatura média em San Sebastián para o ano de 2004

4.5.2. CLIMA DE ANTEQUERA

Antequera é classificada como tendo um clima Csa, ou seja, clima com um Verão bastante seco e caloroso. A temperatura média ao longo do ano é de 15,8°C, oscilando entre 7,2°C no mês de Dezembro e 26,1°C no mês de Agosto. O Verão é bastante quente, com temperaturas médias mensais acima dos 20°C. Quanto às precipitações, no ano de 2008 não se registaram chuvas nos meses de Junho, Julho e Agosto. Relativamente à humidade relativa média mensal, visualiza-se um contraste entre os meses de Verão e o resto do ano.

Os dados utilizados correspondem a um período de dez anos (2001 a 2010), os quais foram retirados do website do IFAPA (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria/servlet/FrontController>). Estes foram observados na Estação Meteorológica de Antequera, pertencente à província de Málaga e cujo código é o 10.

De forma a estudar a interação entre a plataforma ferroviária e a atmosfera, dispõem-se todas as variáveis atmosféricas necessárias: precipitação total diária, humidade relativa média e temperatura média para cada um dos anos do período de referência.

De seguida, são apresentados os dados mensais (precipitação - P, humidade relativa - HR e temperatura - T), correspondentes ao ano de 2008, uma vez que este pode ser considerado como representativo do clima médio no que se refere à precipitação média anual. De notar que as figuras relativos aos restantes anos estão em anexo.

Tabela 5 - Valores médios registados em Antequera para o ano de 2008

Mês	P (mm)	HR (%)	T (°C)
Janeiro	49	74	8.8
Fevereiro	22	67	11.4
Março	35	59	11.3
Abril	88	55	14.5
Maior	74	64	16.1
Junho	0	44	22.8
Julho	0	38	25.6
Agosto	0	38	26.1
Setembro	41	55	21.2
Outubro	140	67	16.4
Novembro	72	72	8.6
Dezembro	50	76	7.2
Ano: 2008	571	59	15.8

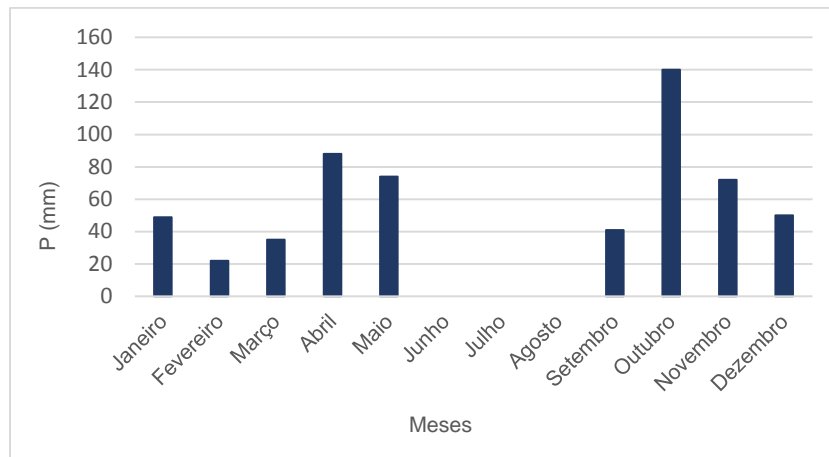


Figura 25 - Valores de precipitação em Antequera para o ano de 2008

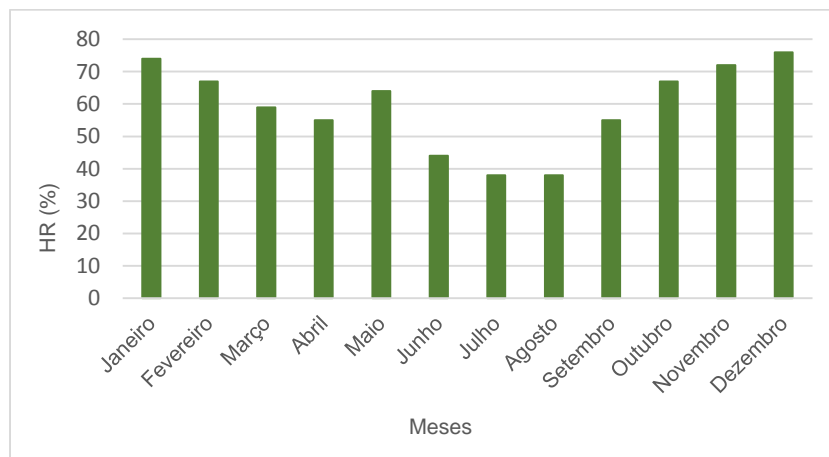


Figura 26 - Valores de humidade relativa média em Antequera para o ano de 2008

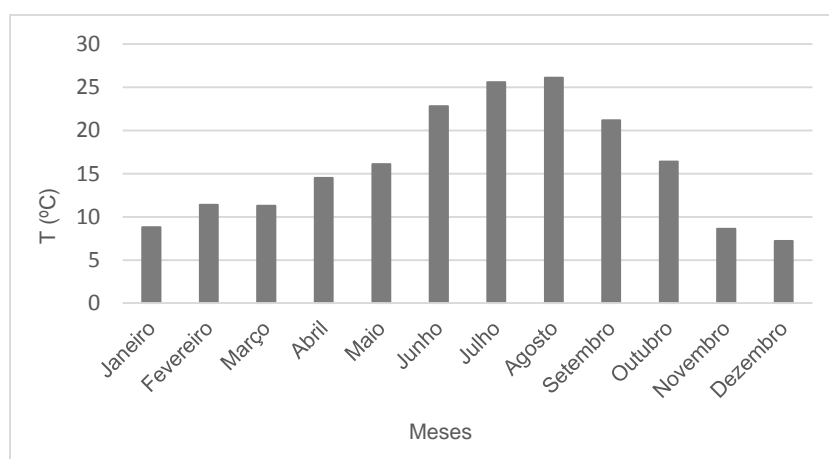


Figura 27- Valores de temperatura média em Antequera para o ano de 2008

5

ANÁLISE HIDROTÉRMICA

5.1. INTRODUÇÃO

Dado que, durante a fase construtiva, os materiais que compõem as plataformas ferroviárias ficam expostos às condições atmosféricas, resultam alterações no teor de humidade, grau de saturação e sucções no interior da plataforma com o tempo. Obviamente que a variação destes parâmetros depende não apenas das propriedades dos materiais, como a granulometria por exemplo, mas, particularmente, das condições atmosféricas do local onde se implementa a obra. As ações atmosféricas como a chuva, mudanças da humidade do ar e temperatura são responsáveis pela infiltração/evaporação, o que resulta em mudanças no teor em água do solo.

De forma a avaliar a influência que os fatores atmosféricos têm nas plataformas ferroviárias, procurou-se simular computacionalmente um caso de obra, onde se impuseram diferentes condições ao programa de elementos finitos *Code_Bright* (que foi descrito no capítulo 4). Como o principal objetivo desta dissertação é verificar se utilizar um material mais grosseiro no solo de fundação (enrocamentos) é vantajoso, foram realizadas duas simulações.

A primeira simulação servirá como caso base, ou seja, será utilizada como uma ferramenta de comparação entre os diferentes resultados obtidos do cálculo. Neste caso ir-se-á impor no *Code_Bright* uma condição de fronteira na base do aterro que simule o nível freático a 2m de profundidade, onde se considerará o fenómeno da capilaridade e, conseqüentemente, qual a influência deste no que toca ao comportamento global do aterro. Desta consideração, e admitindo que a pressão do ar é de 100 kPa, obteve-se um valor da sucção de 20 kPa o qual, como seria de esperar, irá sofrer oscilações durante o ano. No entanto, considerou-se esta hipótese por simplificação para o caso base (mesmo sabendo que este cenário se aproxima mais do clima húmido).

No segundo modelo computacional, focar-se-á o elemento de estudo desta tese já que se impõe como solo de fundação o material de enrocamento. Neste caso, não se considera a existência de nível freático, já que se admitiu que a influência da ascensão de água por capilaridade é pouco representativa ou mesmo nula. É de referir que será com base neste cálculo hidrotérmico que se irá, posteriormente, realizar uma análise mecânica onde se verificará os assentamentos experimentados pelo aterro devido à circulação ferroviária e à exposição ao clima. De seguida, é descrito como se impõe, através de uma condição de fronteira, o enrocamento como solo de fundação.

5.2. CONDIÇÕES INICIAIS E CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

Em ambos os casos não se simulou a construção do aterro, apenas se inseriu diretamente as três camadas distintas e introduziram-se os diferentes materiais com as respectivas características. Por último, atribuíram-se as condições de fronteira.

Começou-se por se atribuir diferentes sucções iniciais aos vários materiais, resultado da proposta de Ridley e Pérez-Romero como foi mencionado no capítulo 4. Assim, para o leito do pavimento atribuiu-se uma sucção de 20 kPa, à parte superior do aterro 50 kPa e ao núcleo uma sucção de 150 kPa.

Os processos de evapotranspiração e os fluxos de ar e água foram automaticamente simulados no próprio programa, onde também se inseriram as séries atmosféricas de 10 anos de ambas as regiões. Estas séries atmosféricas foram introduzidas no programa como um ficheiro de dados onde estão contidas as séries de precipitação, humidade relativa, velocidade do vento, temperatura e índice de nuvens e pressão do ar que se considerou constante e igual a 100 kPa. Estas séries de dados são lidas pelo programa de segundo a segundo, sendo que a transição para o passo de cálculo seguinte apenas é feita quando o sistema computacional está em equilíbrio, o que se traduz num maior rigor na obtenção dos resultados.

É, ainda, de realçar que a impermeabilização do topo do aterro, correspondente à via em laje (impermeável à água) apenas é ativada após 6 meses do início da simulação. Estes 6 meses representam, de um modo grosseiro, o tempo que decorre desde que se termina a estrutura até a colocar em serviço. Então, nos primeiros 6 meses aplica-se as condições atmosféricas (humidade relativa, temperatura, radiação e precipitação) ao topo e à parte lateral do aterro. A partir dos 6 meses, aplica-se as condições atmosféricas à parte lateral do aterro e no topo apenas se aplica temperatura e humidade relativa (uma vez que esta plataforma é impermeável à água). No eixo, considerou-se condição de fluxo nula.

Tendo em conta as condições de fluxo existentes no *Code_Bright*, elegeu-se como caso particular a condição de fronteira atmosférica. Assim, considerou-se que a interação do solo com a atmosfera é devido a precipitação, evaporação, radiação e temperatura que afetam o balanço hidrotérmico do terreno.

No caso base, atribuiu-se ainda uma condição de fronteira de fluxo na base do aterro que simulou o nível freático a 2m de profundidade. Esta é representada por uma condição de fluxo onde o valor da pressão do ar é de 100 kPa e da pressão da água é de 80 kPa. Desta forma, o valor da sucção na base do aterro é de 20 kPa, o que significa que o nível freático se encontra a 2m de profundidade. Para além disso, esta condição de fronteira implica a atribuição de uma temperatura na base do aterro pelo que, após várias simulações, se considerou como valor razoável para o clima seco uma temperatura constante de 20°C e para o clima húmido uma temperatura de 15°C na base do aterro. A imagem seguinte representa esquematicamente o caso base simulado.

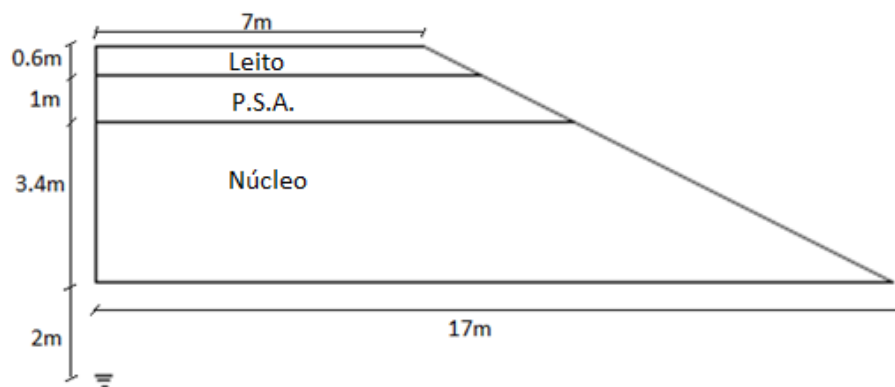


Figura 28 - Esquema do caso base

Finalmente, de forma a simular o material de enrocamento na base do aterro, alterou-se a condição de fronteira na base do aterro, que funciona como um artifício de cálculo. Removeu-se a condição de fluxo associada à pressão de água nos poros e introduziu-se uma nova condição de fronteira que permite que a água passe com facilidade para o solo de fundação (que fisicamente se traduz pela substituição por um material muitíssimo mais permeável, incapaz de gerar pressões neutras). Esta nova condição de fronteira atmosférica, que simula o enrocamento, traduz-se pelo facto deste ser tão permeável e poroso que as condições atmosféricas praticamente não o afetam uma vez que os poros são tão grandes que o fluxo de ar é desimpedido. Uma outra forma de introduzir o material de enrocamento na fundação, seria introduzi-lo diretamente na malha, no entanto, como as curvas de retenção deste tipo de material são muito diferentes do material do núcleo, isto iria criar um processo de cálculo muito instável e cuja convergência seria de difícil obtenção. A imagem seguinte representa esquematicamente o aterro com enrocamento na fundação simulado.

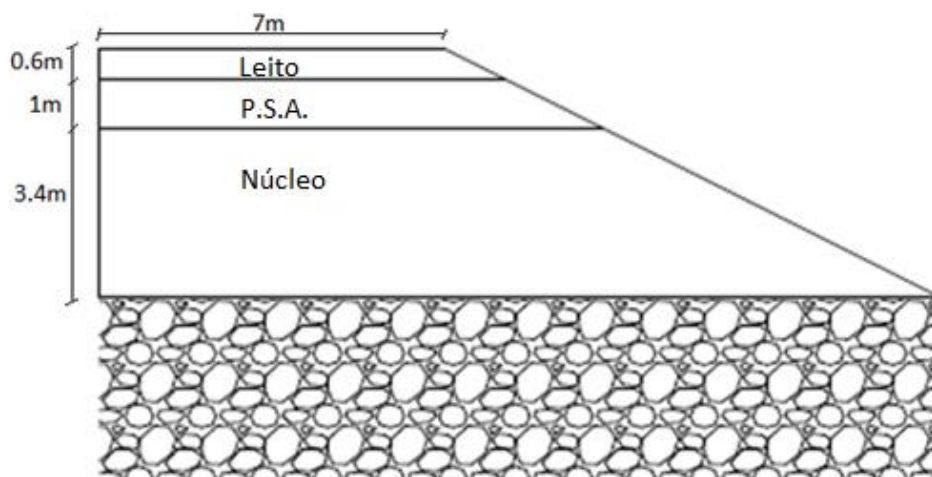


Figura 29 - Esquema do aterro com enrocamento

5.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

De seguida, irão ser apresentados os resultados mais relevantes relativos ao cálculo hidrotérmico dos dois casos evidenciados. Focar-se-ão os aspetos relativos à variação do grau de saturação e sucção ao longo do tempo. É possível, ainda, através do grau de saturação, determinar o teor em água do solo. No entanto, uma vez que se considera o índice de vazios do solo constituinte do aterro constante, a forma do gráfico do teor em água é igual à forma do gráfico do grau de saturação, como se irá verificar de seguida. É de notar que as figuras apresentadas revelam os resultados ao longo de um período de 10 anos. Para além disso, estas são o resultado da evolução dos parâmetros grau de saturação e sucção ao longo do eixo do aterro em pontos situados a diferentes alturas, sendo os valores apresentados na legenda da própria figura. Assim, à base do aterro corresponde a altura de 0 m e ao topo 5 m. O núcleo situa-se entre os 0 m e 3,4 m, a parte superior do aterro entre 3,4 m e 4,4 m e a leito do pavimento entre os 4,4 m e 5 m. Em algumas das figuras, é ainda representada a série temporal de precipitação aplicada na análise em questão, série essa que se pode visualizar na figura seguinte:

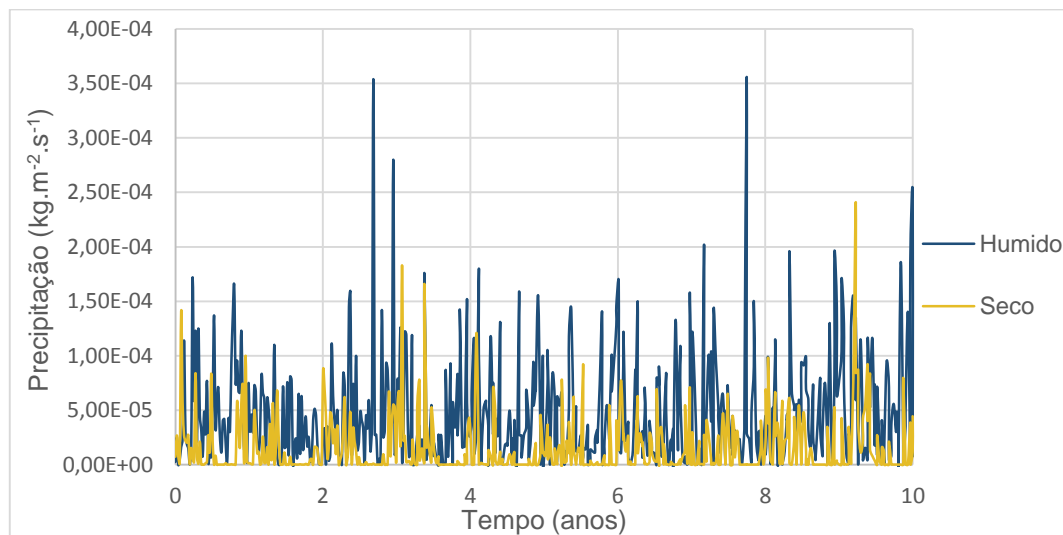


Figura 30 - Série da precipitação utilizada para ambos os climas no período de 10 anos

Pela figura anterior, constata-se que na região de Antequera a precipitação é ligeiramente inferior a San Sebastián, o que irá influenciar, em parte, os resultados obtidos. É de esperar que os aterros sujeitos ao clima de San Sebastián, por estarem submetidos a maiores precipitações e temperaturas mais reduzidas, alcancem o estado saturado mais rapidamente que os aterros que experimentam o clima mais seco, isto é, temperaturas mais elevadas e menores precipitações. Este facto irá ser refletido, posteriormente, na análise mecânica no cálculo dos assentamentos.

5.3.1. GRAU DE SATURAÇÃO

O grau de saturação, “ S_r ” pode ser definido como a percentagem de água presente nos vazios de um solo e expressa-se pela equação 1, descrita no segundo capítulo. O grau de saturação é um parâmetro que se retira imediatamente do programa utilizado, *Code_Bright*.

5.3.2. TEOR EM ÁGUA

O teor em água do solo é definido como a massa de água (P_a) contida numa amostra de solo dividida pela massa de solo seco (P_s) que, quando multiplicado por 100, é expressa em percentagem:

$$w = \frac{P_a}{P_s} \times 100 (\%) \quad (13)$$

É possível determinar o teor em água do solo (ou humidade) através do seu grau de saturação recorrendo à seguinte expressão:

$$G \times w = S_r \times e \quad (14)$$

Assim, a forma do gráfico do teor em água é igual à forma do gráfico do grau de saturação uma vez que o parâmetro G e índice de vazios são constantes. O parâmetro G vale 2,75 enquanto o índice de vazios do solo, “ e ”, se considerou contante nas três camadas igual a 0,3.

Por este motivo, de seguida, se irá fazer a análise dos resultados tendo em conta apenas o grau de saturação do material e sucção.

5.3.3. SUCÇÃO

Definiu-se a sucção com algum pormenor no capítulo 2.3 desta tese. É só de referir que, neste caso, a sucção foi calculada como sendo a diferença entre a pressão do ar e a pressão da água. Considerou-se, por defeito, que a pressão do ar correspondia à pressão atmosférica, sendo esta de 0,1MPa.

5.3.4. ANÁLISE DO CLIMA HÚMIDO

As figuras seguintes (figs. 31 e 32) expressam a evolução do grau de saturação no eixo de simetria do aterro ao longo de 10 anos, sendo o primeiro referente ao caso base, isto é, aterro cujo solo de fundação tem o nível freático a 2 m de profundidade e o segundo refere-se ao aterro cujo solo de fundação é o material de enrocamento. Estes incluem, ainda, a série temporal correspondente à precipitação, de forma a facilitar a análise. São, ainda, apresentadas as figuras (figs. 33 e 34) referentes à sucção no eixo de simetria do aterro ao longo da série temporal estudada.

Como era de esperar, o grau de saturação do núcleo (0 a 3,4 m) comparativamente ao leito do pavimento (4,4 a 5 m) e parte superior do aterro (3,4 a 4,4 m) é muito mais elevado, chegando mesmo a atingir o estado praticamente completo de saturação aproximadamente aos 4 anos (figs. 36 e 39) retiradas do programa *Code_Bright*.

Verifica-se, ainda, grandes variações nos primeiros 6 meses em ambas as situações, especialmente no leito do pavimento. Isto deve-se ao facto de a via em laje ainda não ter sido colocada o que faz com que o solo esteja diretamente em contacto com as condições atmosféricas.

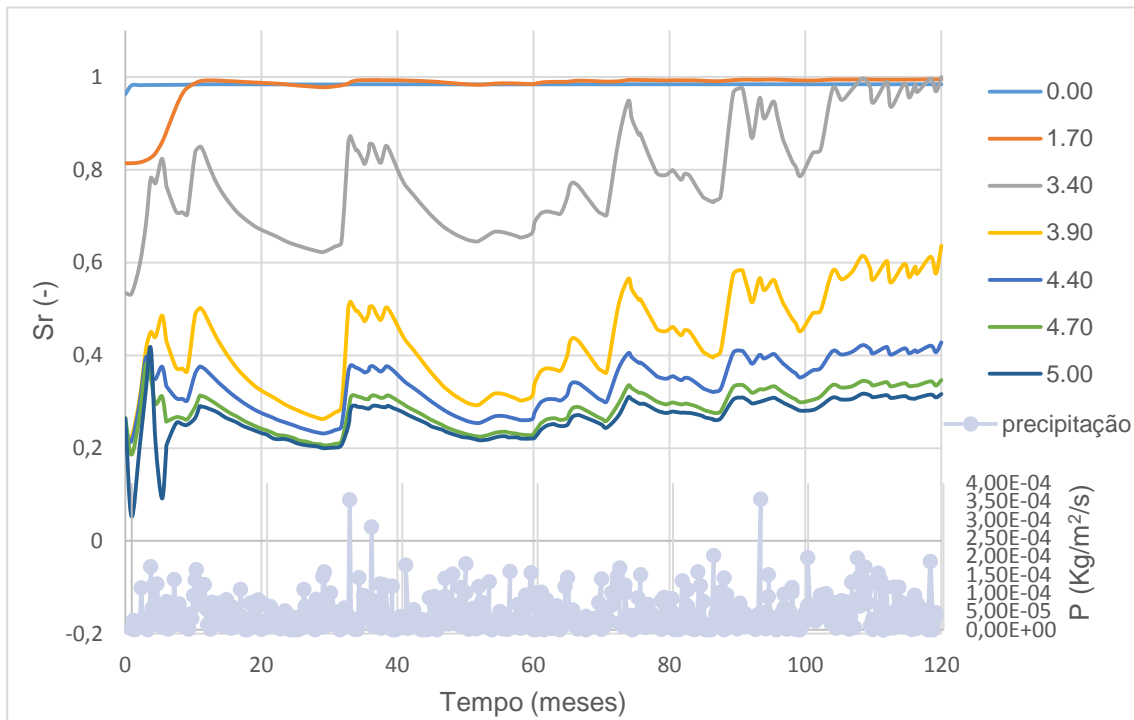


Figura 31 -Evolução do grau de saturação ao longo do tempo para o caso base

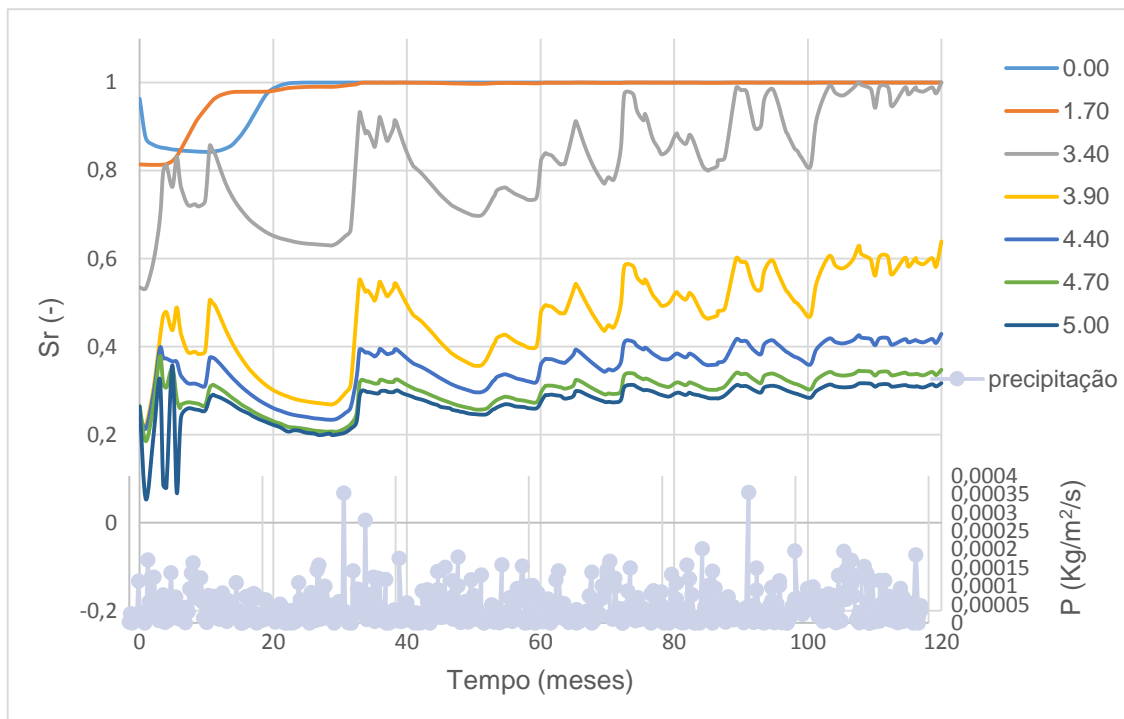


Figura 32 - Evolução do grau de saturação ao longo do tempo para o aterro com enrocamento

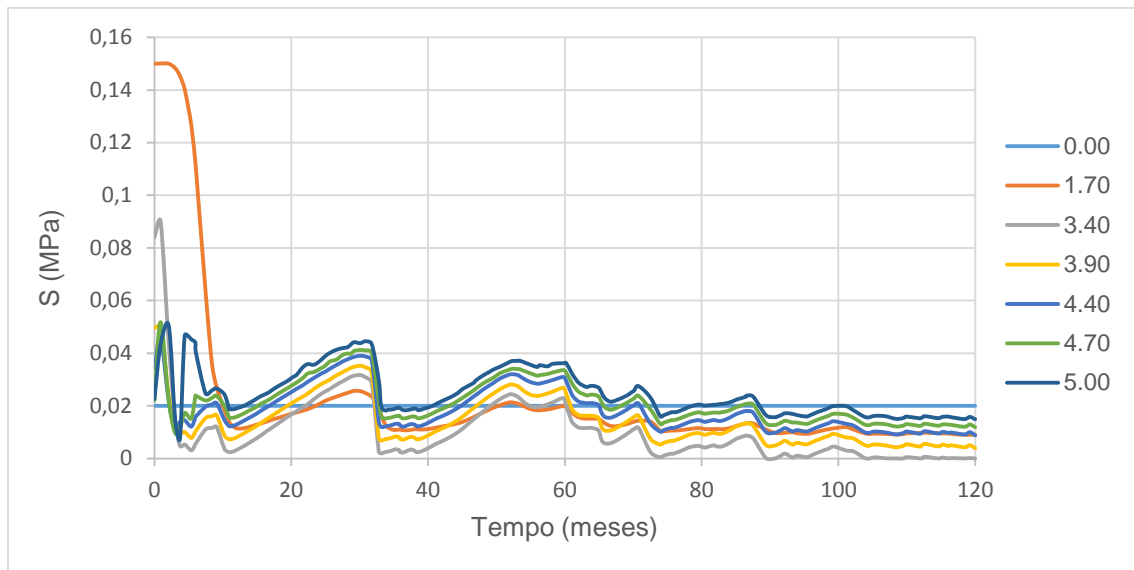


Figura 33 - Evolução da sucção ao longo do tempo para o caso base

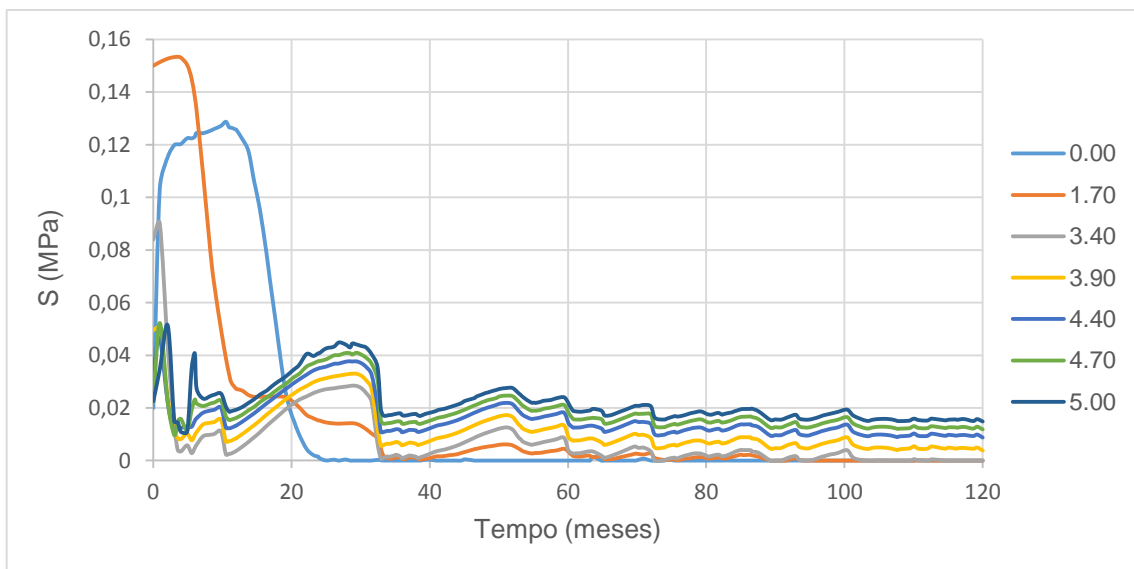
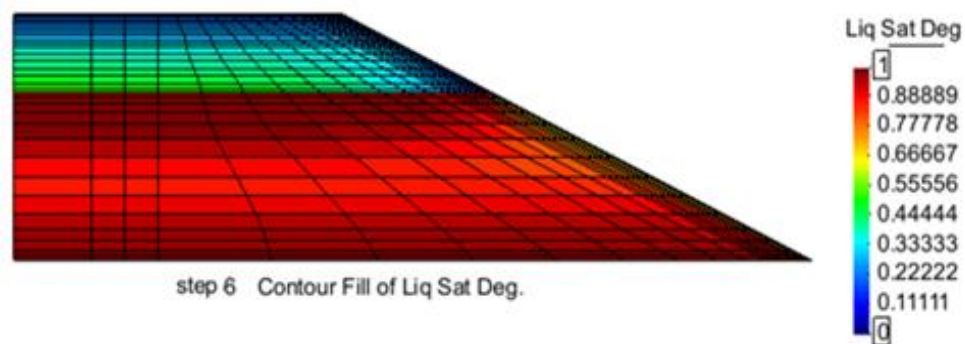


Figura 34 - Evolução da sucção ao longo do tempo para o aterro com enrocamento

Figura 35 - Grau de Saturação do aterro caso base após 6 meses - imagem retirada do *Code_Bright*

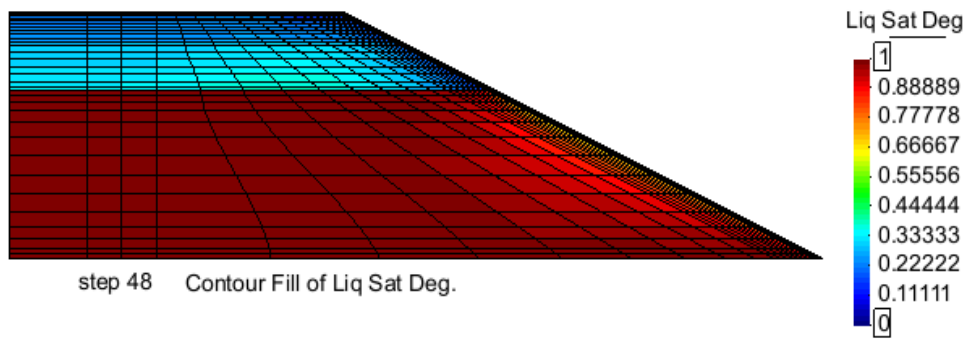


Figura 36 - Grau de Saturação do aterro caso base após 48 meses (4 anos) - imagem retirada do *Code_Bright*

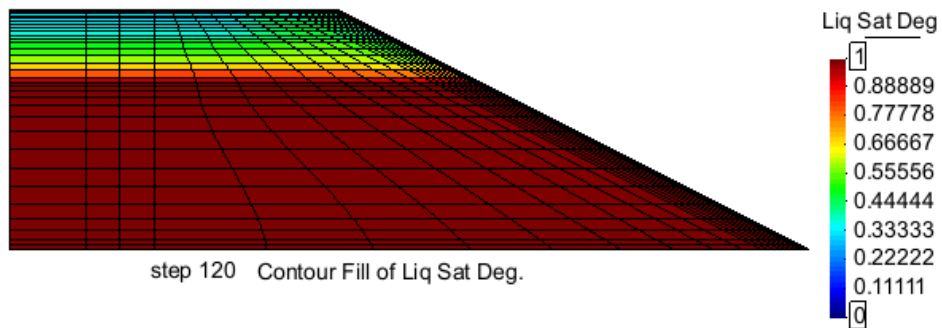


Figura 37 - Grau de Saturação do aterro caso base após 120 meses (10 anos) - imagem retirada do *Code_Bright*

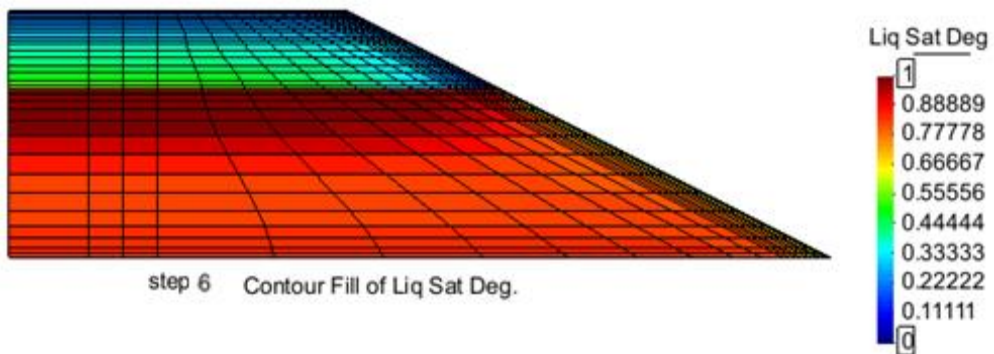


Figura 38 - Grau de Saturação do aterro com enrocamento após 6 meses - imagem retirada do *Code_Bright*

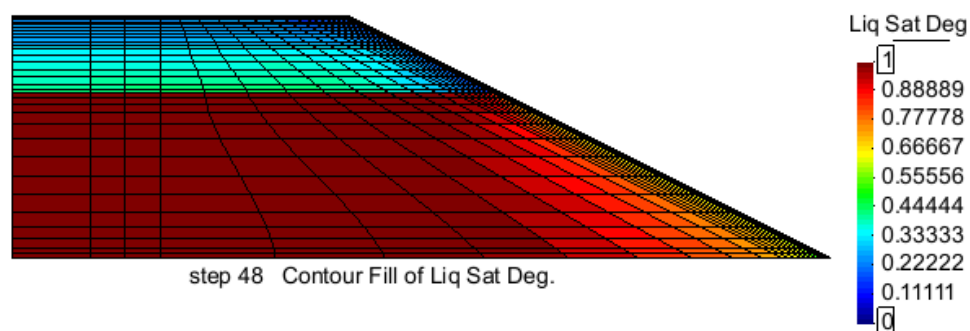


Figura 39 - Grau de Saturação do aterro com enrocamento após 48 meses (4 anos) - imagem retirada do *Code_Bright*

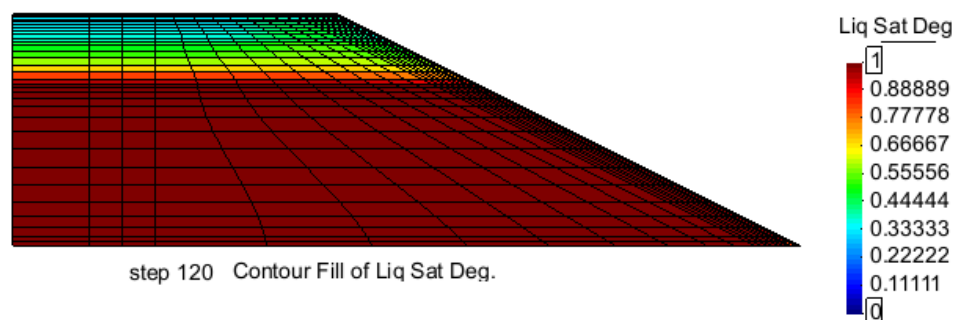


Figura 40 - Grau de Saturação do aterro com enrocamento após 120 meses (10 anos) - imagem retirada do *Code_Bright*

Nas figuras seguintes, estão representados o grau de saturação e sucção para ambos os aterros. A linha azul escura é referente ao caso base enquanto a linha azul clara refere-se ao aterro cujo solo de fundação é o enrocamento.

Na figura 41, visualiza-se a variação do grau de saturação na parte superior do leito do pavimento uma vez que esta é a que irá sofrer maiores variações. A influência que o enrocamento tem no leito do pavimento é mínima, porque, como era de esperar, o efeito deste irá ser maior no núcleo (camada mais próxima da fundação). Na figura 42, pode-se verificar as variações da sucção nos primeiros 6 meses. É de notar que as mudanças de sucção antes de se atingir os 6 meses são mais visíveis no clima seco, facto que se irá justificar mais à frente. Para além disso, visualiza-se que as sucções estão em total coerência com as variações do grau de saturação, isto é, quando este aumenta, as sucções tendem a diminuir e vice-versa.

Obviamente que quanto mais próximo da leito do pavimento, mais rápida a resposta à precipitação é, daí que haja uns picos de sucção no topo do aterro antes da instalação da via em laje. Assim, a partir dos 6 meses (após se colocar a via em laje), as sucções são amortecidas significativamente, principalmente no leito do pavimento. Para além disso, como no topo do aterro passa a existir uma camada de impermeabilização, a precipitação não atinge diretamente o solo, passando o fluxo de água a ser apenas lateral.

Quando há picos de precipitação, o grau de saturação imediatamente aumenta (por exemplo aproximadamente aos 30 meses) e, conseqüentemente, a sucção diminui.

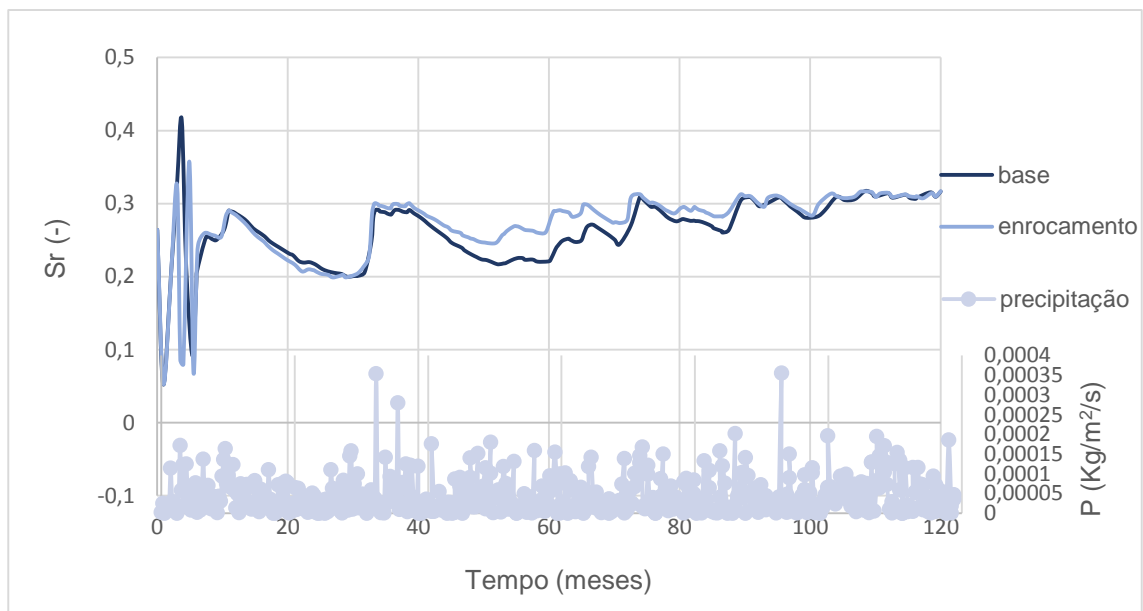


Figura 42 - Evolução do grau de saturação para ambos os aterros no leito do pavimento

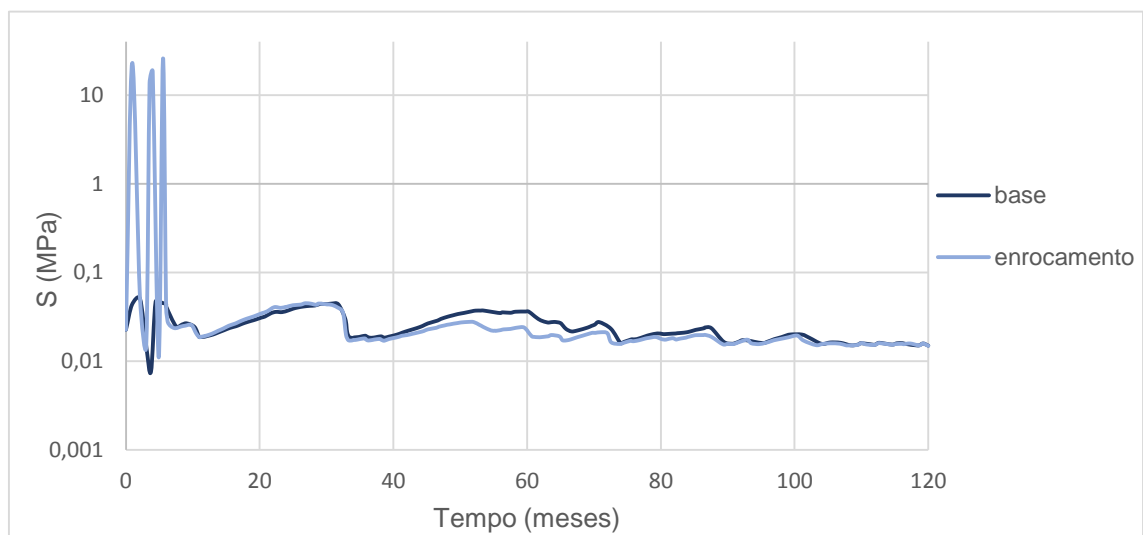


Figura 41 - Evolução da sucção para ambos os aterros no leito do pavimento

As figuras seguintes representam o ponto médio do núcleo, ou seja, a 1,7m a partir da base do aterro. Fez-se a análise para este ponto uma vez que as condições de fronteira introduzidas na base do aterro influenciam os resultados.

Até aos primeiros 6 meses, a entrada de água no corpo do aterro dá-se pela superfície de coroamento, que ainda não se encontra revestida, bem como pela superfície superior adjacente do talude do aterro. A partir daí, a entrada de água passa a dar-se apenas pela região lateral. Isto influencia bastante o grau de saturação das várias camadas do aterro. Na figura 41, observa-se que no caso do aterro com enrocamento, este satura mais rapidamente que o aterro com fundação em solo. Ambos os núcleos começam com sucção de 0,15 MPa (sucção inicial imposta) e esta vai diminuindo ao longo do tempo, conforme o núcleo vai saturando. Apesar das diferenças serem muito pouco significativas, após a análise do grau de saturação e sucção nas várias camadas do aterro, pode-se dizer que, no caso de um clima húmido, o uso de enrocamento como solo de

fundação não traz qualquer vantagem, dado que as sucções são sempre menores neste, comparativamente ao caso base.

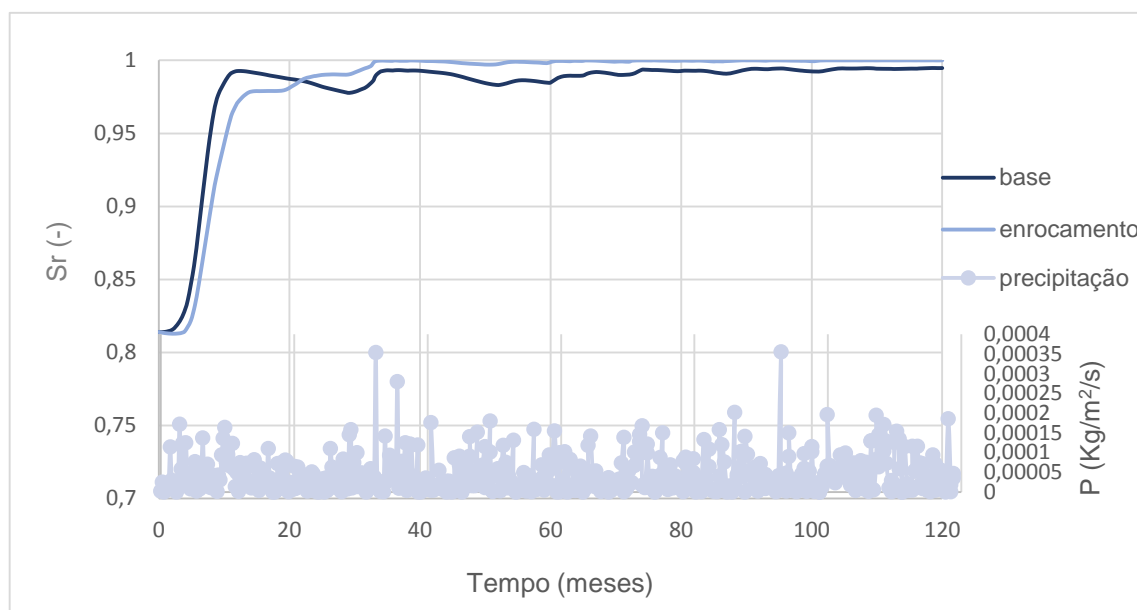


Figura 43 - Evolução do grau de saturação para ambos os aterros no núcleo

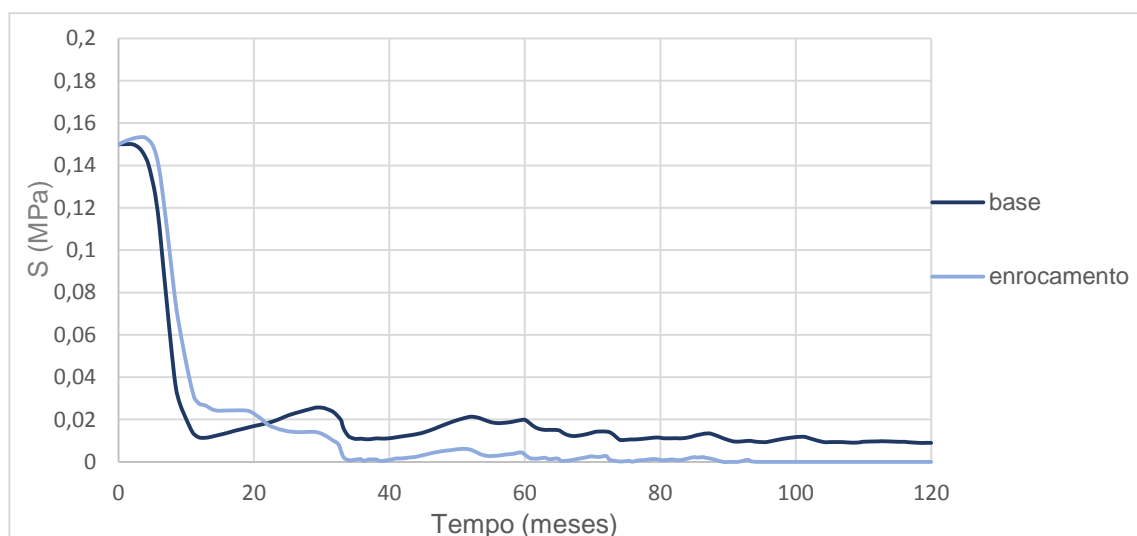


Figura 44 - Evolução da sucção para ambos os aterros no núcleo

O grau de saturação dos materiais do aterro depende dos fluxos de água e da evaporação a que este está sujeito. Apesar da evaporação não ser um aspeto determinante no caso do clima húmido, pode vir a influenciar bastante no clima seco.

Para o clima húmido, avaliou-se a quantidade de água que se infiltra no aterro através da lateral e da base, de forma a avaliar o quão determinante é a fronteira que se inseriu na base do aterro. Ignorou-se o topo do mesmo, uma vez que a partir dos 6 meses este torna-se impermeável. Seguidamente, observou-se a evaporação que se dá pelas mesmas zonas.

Em ambas as análises, foram tidas em conta as direções “x” e “y”, pois trata-se de um problema bidimensional. Considerou-se que o sentido positivo na direção vertical é para cima e na direção horizontal é para o lado direito, como se pode observar na seguinte imagem (sentido positivo adotado no programa *Code_Bright*).

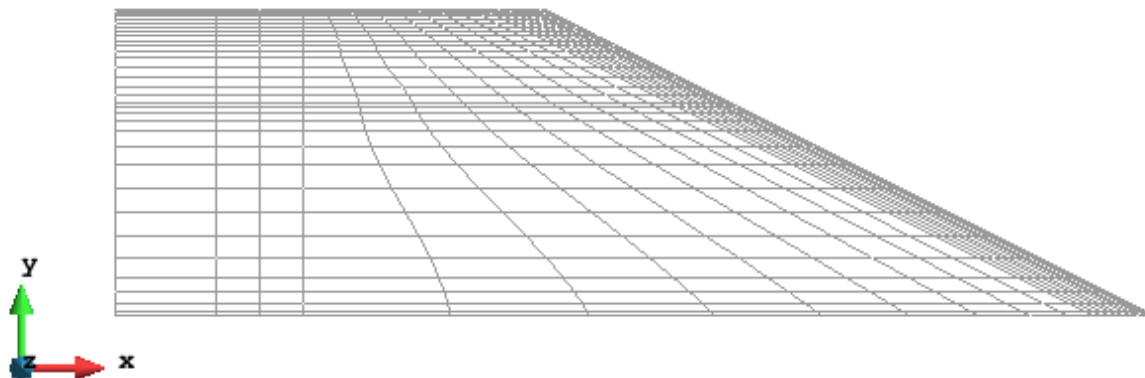


Figura 45 - Sentido positivo dos eixos em ambas as direções adotado no programa *Code_Bright*

Como referido no capítulo 4 (tabela 1) os fluxos de água neste programa são obtidos segundo a lei de Darcy enquanto os fluxos de vapor de água segundo a lei de Fick. Nas tabelas seguintes podem-se visualizar a quantidade de água que entra em estado líquido pela lateral e pela base e ainda a que sai em forma de vapor de água na totalidade.

Tabela 6 - Quantidade de água que entra no aterro pela base e lateral

Fluxo líquido (Kg/s)		Caso Base	Aterro com Enrocamento
Clima Húmido	Lateral	1,15e-4	9,67e-5
	Base	3,44e-6	4,06e-7

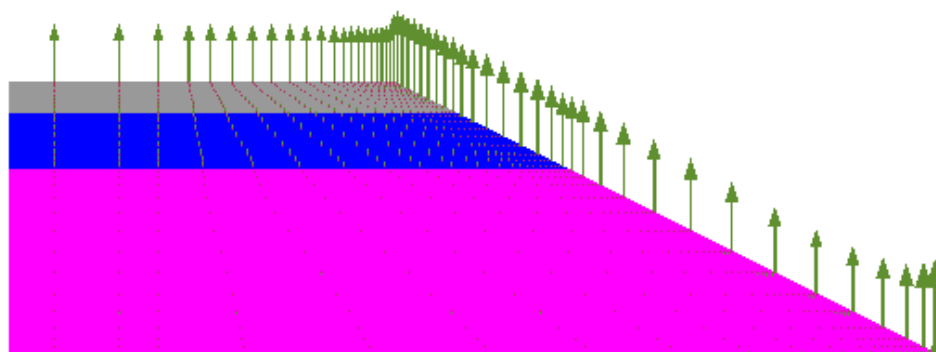
Tabela 7 - Balanço final da evaporação no aterro

Fluxo vapor água (Kg/s)	Caso Base	Aterro com Enrocamento
Clima Húmido	1,23e-3	1,48e-3

Como se verifica na tabela 6, a quantidade de água que entra pela base do aterro é mínima comparativamente à água que entra pela lateral do aterro. Daí que se tenham obtido resultados tão semelhantes relativamente ao grau de saturação dos materiais. É também por este motivo que a fronteira da base do aterro não é muito relevante, sendo, então, o enrocamento uma alternativa não muito vantajosa. Apesar das diferenças serem mínimas, a saída de água através de vapor é mais notória no caso do aterro com enrocamento uma vez que a água facilmente passa pelos poros deste material na forma de vapor. A título exemplificativo, é apresentada de seguida uma figura que evidencia a saída de água por evaporação aos 5 meses e aos 48 meses no aterro com enrocamento no solo de fundação. Escolheu-se estes períodos temporais para mostrar que antes da instalação da via em laje a evaporação dá-se tanto na parte lateral do aterro como pela

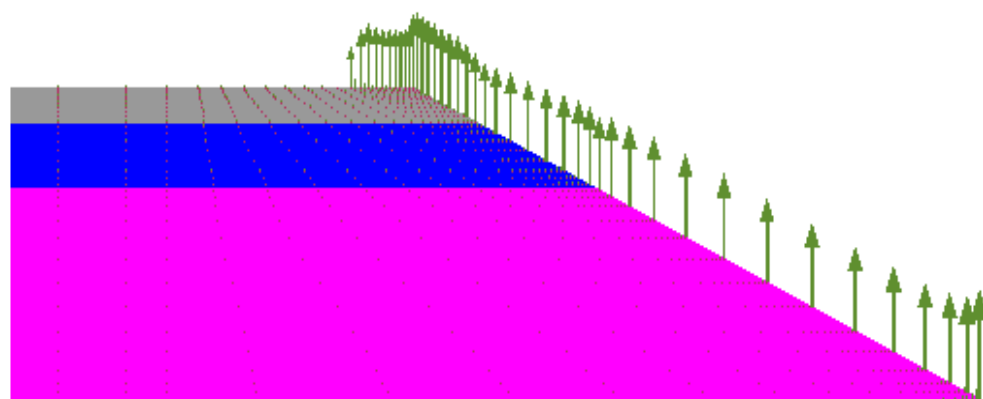
superfície do topo. A partir do momento que se coloca esta plataforma, o fluxo de vapor de água é totalmente impedido na parte superior do aterro.

É de notar, na figura que evidencia os 48 meses (fig. 47), que o vapor de água apenas pode sair pela extremidade do topo e pela parte lateral uma vez que, na restante parte do topo, tem a via em laje, o que impede o fluxo desta.



step.5 Display Vectors of i vapour, Y-i vapour

Figura 46 - Evaporação no aterro caso base após 5 meses – imagem retirada do *Code_Bright*



step 48 Display Vectors of i vapour, Y-i vapour

Figura 47 - Evaporação no aterro caso base após 48 meses (4 anos) – imagem retirada do *Code_Bright*

5.3.5. ANÁLISE DO CLIMA SECO

As figuras (figs. 48 e 49) seguintes expressam a evolução do grau de saturação no eixo de simetria do aterro ao longo de 10 anos, sendo o primeiro referente ao caso base, isto é, aterro cujo solo de fundação tem o nível freático a 2 m de profundidade e o segundo refere-se ao aterro cujo solo de fundação é o material de encoramento. Estes incluem, ainda, a série temporal correspondente à precipitação de forma a facilitar a análise. São, também, apresentadas as figuras referentes à sucção, exatamente nos mesmos pontos (figs. 50 e 51).

Como era de esperar, o grau de saturação do núcleo (0 a 3,4 m) comparativamente ao leito do pavimento (4,4 a 5 m) e parte superior do aterro (3,4 a 4,4 m) é muito mais elevado. No entanto, é de notar que no clima de Antequera, mesmo após 120 meses (10 anos) o núcleo não atingiu o estado completo de saturação (figs. 53 e 55), contrariamente ao que acontece no clima de San Sebastián cujo núcleo satura aproximadamente aos 4 meses. O facto do grau de saturação ainda

não ter atingido a unidade após 10 anos, é mais visível no caso do aterro com enrocamento (figura 55).

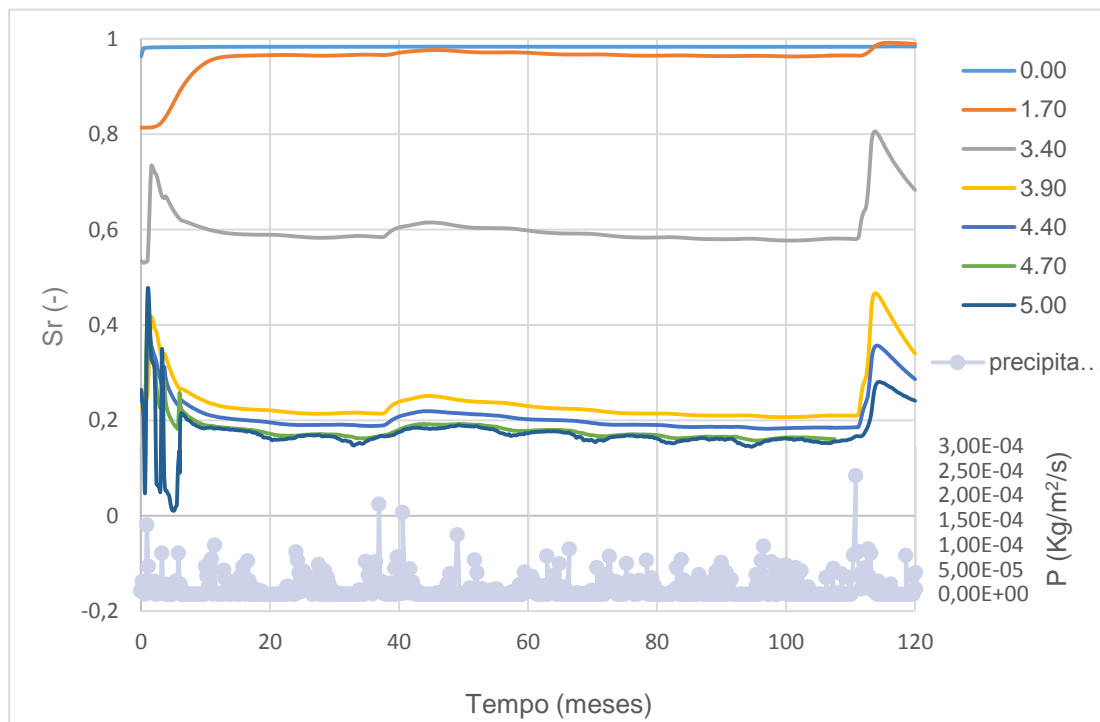


Figura 48 - Evolução do grau de saturação ao longo do tempo no caso base

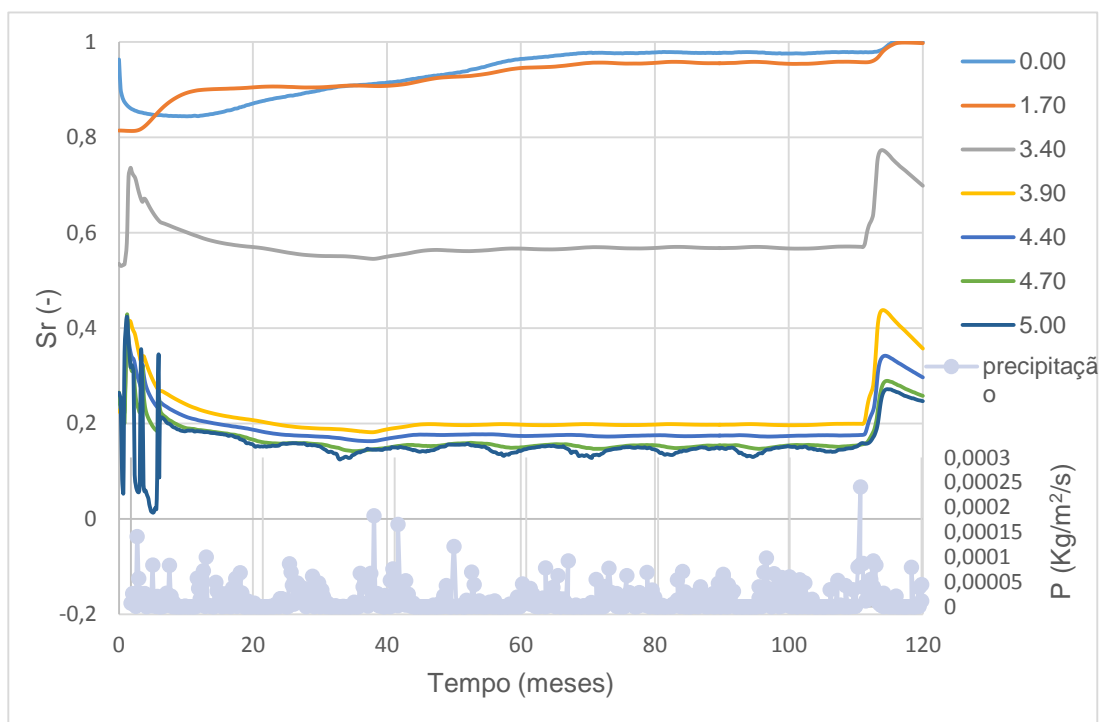


Figura 49 - Evolução do grau de saturação ao longo do tempo no aterro com enrocamento

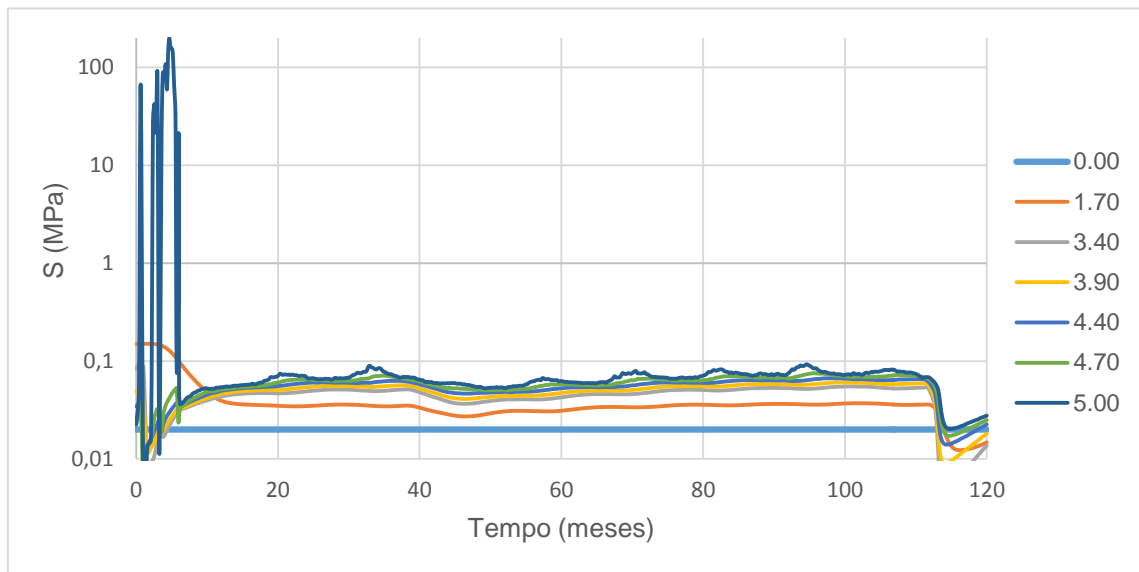


Figura 50 - Evolução da sucção ao longo do tempo no caso base

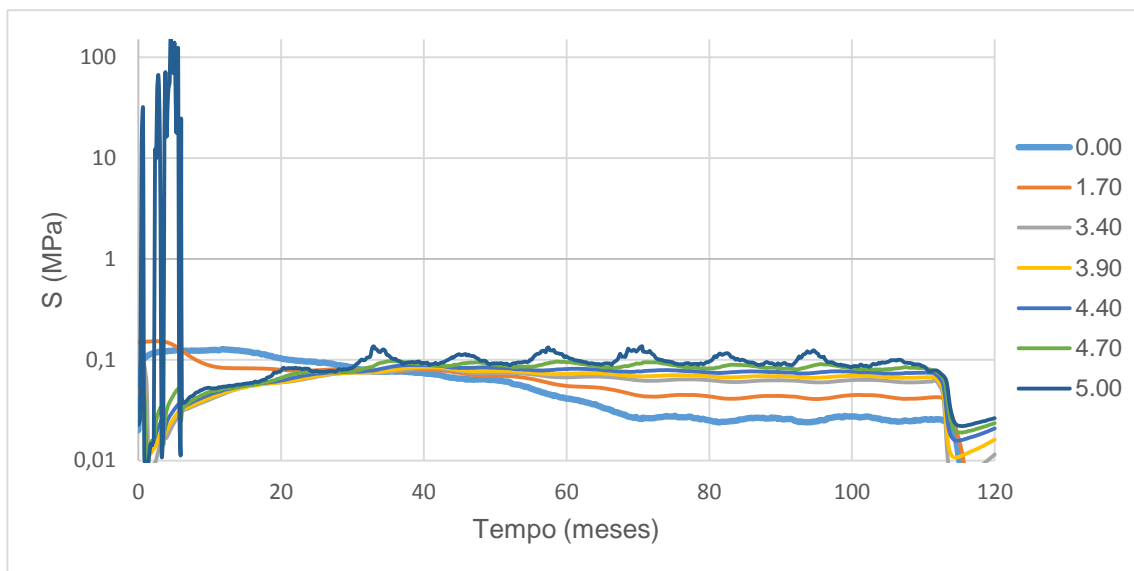


Figura 51 - Evolução da sucção ao longo do tempo no aterro com enrocamento

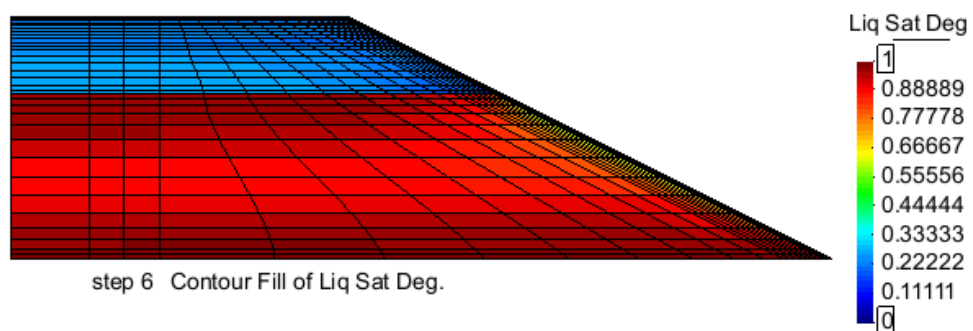


Figura 52 - Grau de Saturação do aterro caso base após 6 meses – imagem retirada do *Code_Bright*

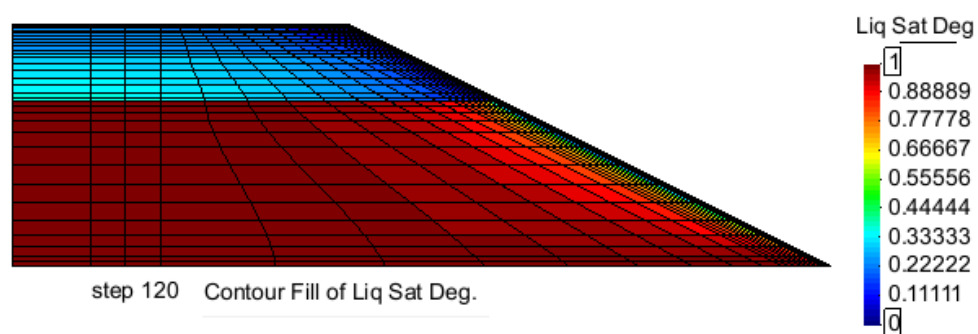


Figura 53 - Grau de Saturação do aterro caso base após 120 meses (10 anos) – imagem retirada do *Code_Bright*

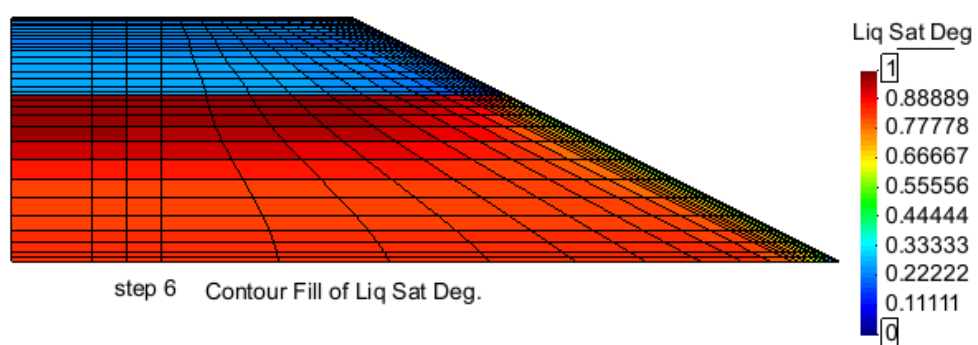


Figura 54 - Grau de Saturação do aterro com enrocamento após 6 meses – imagem retirada do *Code_Bright*

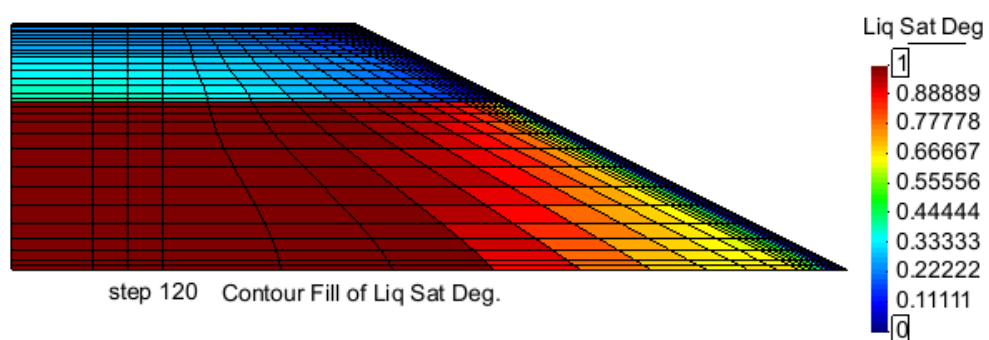


Figura 55 - Grau de Saturação do aterro com enrocamento após 120 meses (10 anos) – imagem retirada do *Code_Bright*

Nas figuras seguintes, estão representados o grau de saturação e sucção para ambos os aterros. A linha verde escura é referente ao caso base enquanto a linha verde clara refere-se ao aterro cujo solo de fundação é o enrocamento.

Optou-se por escolher o topo da leito do pavimento para evidenciar as variações do grau de saturação e sucção, pois esta é a que irá sofrer maiores variações já que se encontra sob influência direta das condições atmosféricas.

Até à instalação da via em laje (6 meses), a leito do pavimento está diretamente sujeita aos efeitos climáticos, nomeadamente à precipitação. Como era de esperar, as variações do grau de saturação nestas são mais visíveis antes da colocação da laje, uma vez que os efeitos de evaporação e infiltração se fazem sentir mais fortemente e diretamente no solo. Assim, é de esperar que haja uma variação tão acentuada nos primeiros meses do grau de saturação na leito do pavimento e daí que se visualizem picos de sucção tão elevados na figura 57, chegando a atingir sucções da ordem dos 100 MPa, correspondentes às variações visualizadas do grau de saturação nos primeiros 6 meses. Estes picos de sucção não são tão visíveis no clima húmido, uma vez que neste, o grau de saturação das várias camadas nunca chega a atingir valores tão baixos como no caso do clima seco. Isto deve-se ao facto de no clima seco, o solo conseguir secar mais rapidamente que no clima húmido devido às temperaturas mais elevadas. Ora, é este fenómeno que faz com que o grau de saturação aumente e diminua tão rapidamente e que haja variações de sucções tão drásticas. Após a colocação da plataforma, e como o fluxo de água passa a ser lateral, o grau de saturação não sofre variações tão intensas e, consequentemente, as sucções estão mais estabilizadas.

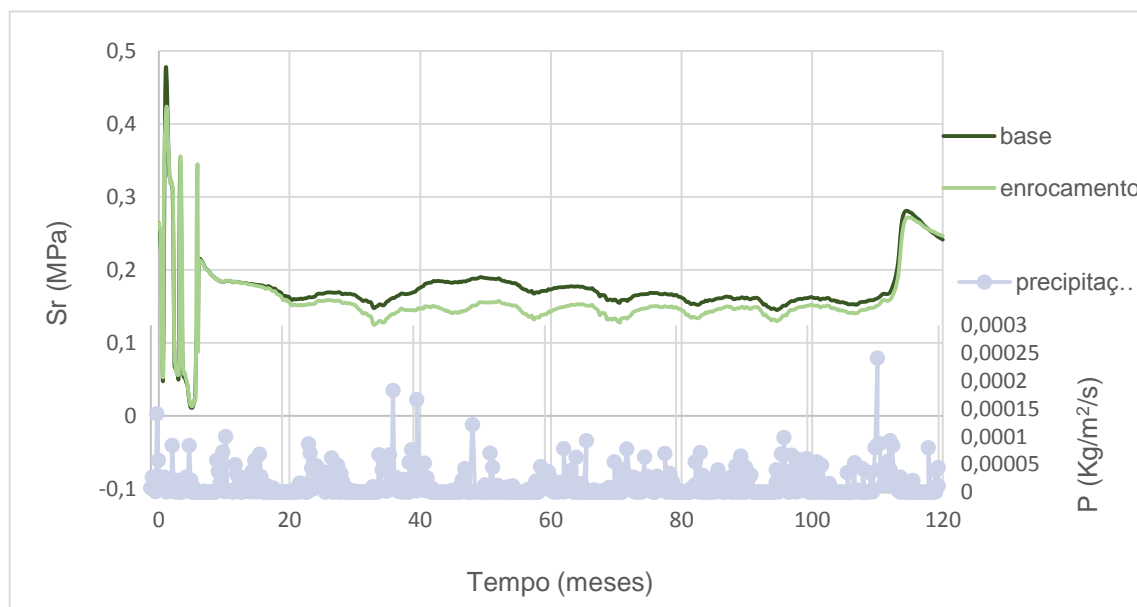


Figura 56 - Evolução do grau de saturação para ambos os aterros no leito do pavimento

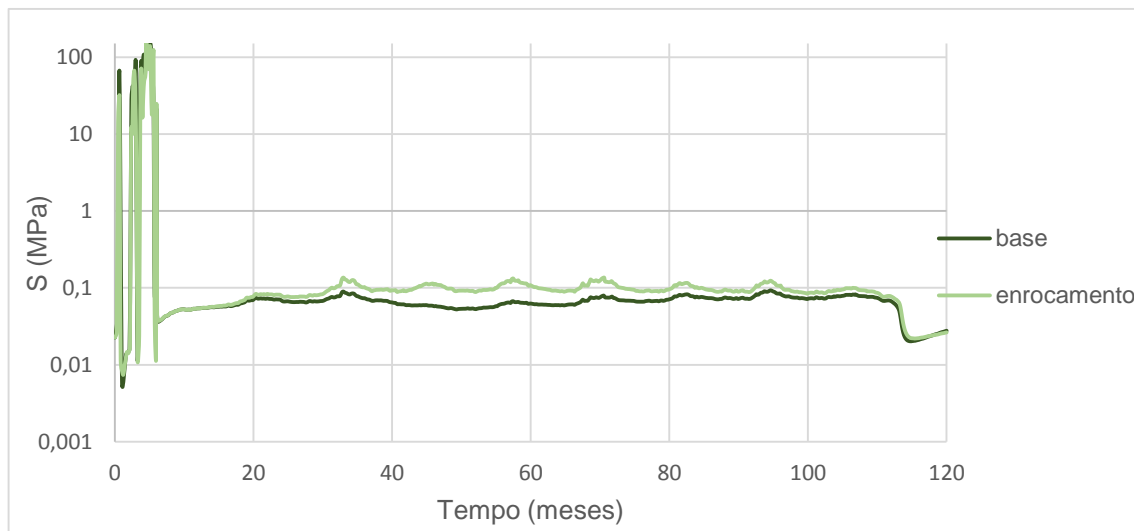


Figura 57 - Evolução da sucção para ambos os aterros no leito do pavimento

De seguida, são apresentados as figuras que representam o ponto médio do núcleo, ou seja, a 1,7 m a partir da base do aterro. Mais uma vez, fez-se a análise para este ponto, pois as condições de fronteira introduzidas na base do aterro influenciam os resultados.

Até aos 6 meses iniciais, há um aumento do grau de saturação mais acentuado devido ao solo estar em contacto direto com as condições atmosféricas. A partir do momento que se instala a via em laje, o topo do aterro passa a ser impermeável e, consequentemente, os fluxos de água são apenas laterais uma vez que a entrada de água devido à precipitação apenas se dá pela parte lateral do mesmo. Assim, o aumento do grau de saturação dá-se de uma forma mais gradual e não tão abrupta. No caso do aterro com enrocamento, e como este material é muito permeável, a água tende a infiltrar-se com bastante facilidade neste e, desta forma, o núcleo do aterro não satura com tanta facilidade como no caso base. Aproximadamente aos 70 meses é que o núcleo fica com um grau de saturação parecido no caso do aterro base e no aterro com enrocamento. Até este período visualiza-se uma grande diferença no grau de saturação, sendo este menor no caso do aterro com enrocamento no solo de fundação. Como consequência, como se visualiza na figura 59, as sucções são superiores neste aterro, o que, à partida, o torna mais estável.

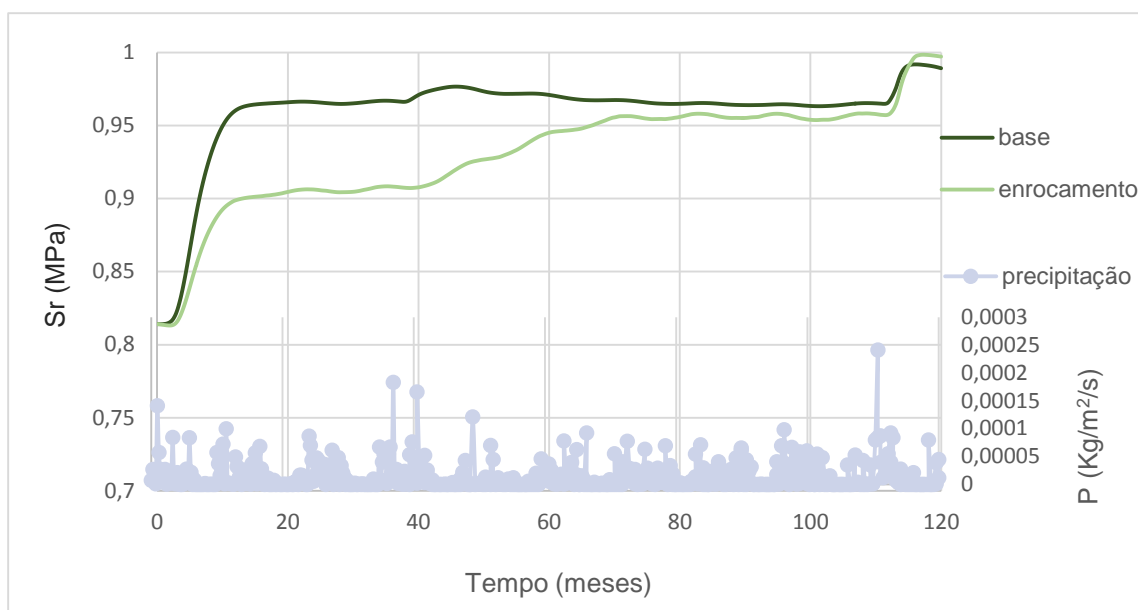


Figura 58 - Evolução do grau de saturação para ambos os aterros no núcleo

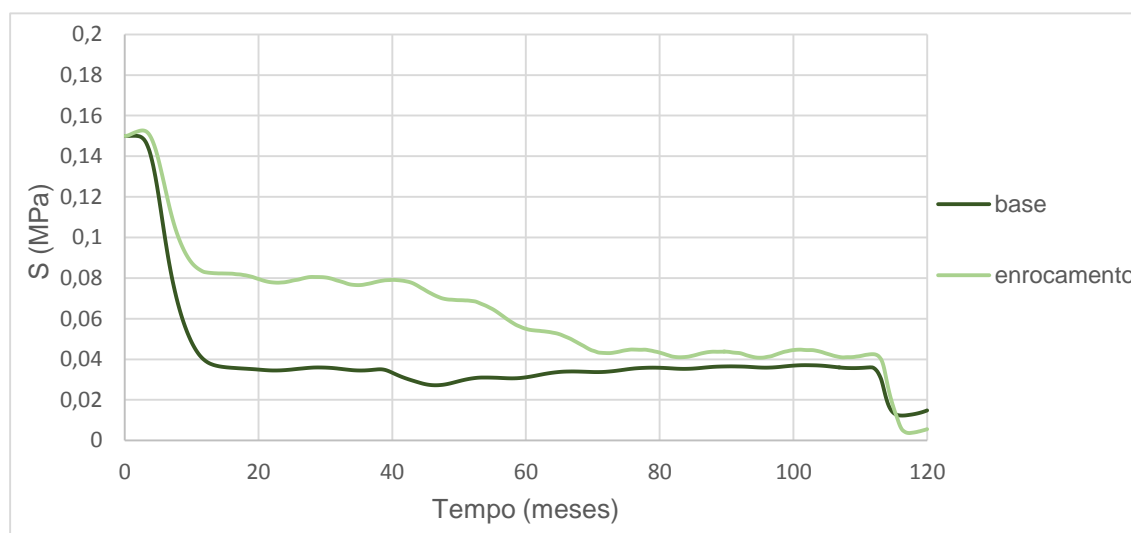


Figura 59 - Evolução da sucção para ambos os aterros no núcleo

Mais uma vez, verifica-se que a água que entra pela base do aterro apresenta valores muito reduzidos, tanto no caso base como caso do aterro com enrocamento. Isto reflete-se então nas diferenças mínimas obtidas no grau de saturação na sua generalidade, ou seja, o facto da condição de fronteira na base não ser muito relevante implica que não haja diferenças significativas nos resultados obtidos.

No entanto, neste caso a evaporação tem um papel mais notório do que no clima húmido, uma vez que, como as temperaturas são mais elevadas, o vapor de água que sai do aterro é mais significativo. Como é de notar na tabela seguinte, as diferenças experimentadas entre o caso base e o aterro com enrocamento são mínimas, no entanto a evaporação pode facilitar o processo de secagem e, desta forma, atrasar a saturação das várias camadas do aterro.

Tabela 8 - Quantidade de água que entra no aterro pela base e lateral

Fluxo líquido (Kg/s)		Caso Base	Aterro com Enrocamento
Clima Seco	Lateral	1,26e-4	5,54e-6
	Base	2,18e-6	1,26e-7

Tabela 9 - Balanço final da evaporação no aterro

Fluxo vapor água (Kg/s)	Caso Base	Aterro com Enrocamento
Clima Seco	5,59e-2	4,07e-2

5.3.6. CONCLUSÕES

De uma forma geral, pode-se dizer que, após se analisar o grau de saturação, os enrocamentos no solo de fundação são vantajosos no caso do clima de Antequera (clima seco). Como este material é muito permeável, a água proveniente da precipitação tende a percolar com relativa facilidade através deste material, o que permite a diminuição dos graus de saturação dos restantes materiais constituintes do aterro. No caso do clima de San Sebastián (clima húmido), este enrocamento pode não trazer muitas vantagens pois, como se pode observar nas figuras anteriores e apesar das diferenças serem mínimas, o aterro com este tipo de material satura mais rapidamente. É só de notar que nas simulações realizadas o nível freático no caso base não altera, isto é, mantêm-se sempre à profundidade de 2m pelo que os resultados obtidos estão ligeiramente influenciados por esta consideração.

Como era expectável, o efeito do clima tem uma grande influência no grau de saturação dos materiais constituintes do aterro. As curvas de evolução temporal do grau de saturação são ligeiramente diferentes para os dois climas experimentados, independentemente do tipo de aterro, ou seja, tanto para o caso base como para o aterro que tem enrocamento no solo de fundação, o grau de saturação é mais elevado para o clima húmido. Quando se faz a análise do clima de San Sebastián (húmido), observa-se que o grau de saturação dos materiais é maior, tanto nos materiais de resposta hidráulica mais lenta (como é o caso do material do núcleo) como nos materiais de resposta hidráulica rápida (leito do pavimento e parte superior do aterro), porque aproximadamente aos 48 meses (4 anos) o núcleo encontra-se praticamente saturado. Por sua vez, quando se está a analisar o clima de Antequera (seco), observa-se que mesmo após 120 meses (10 anos), o núcleo ainda não chegou ao estado completo de saturação. Nas restantes camadas, mesmo em pontos imediatamente abaixo da via em laje, no clima húmido observa-se uma maior acumulação de água.

Também se verificou que a evaporação, consequência das elevadas temperaturas e então de um processo de secagem, é um aspeto que condiciona bastante o grau de saturação e teor em água dos materiais. Como se verificou, a evaporação faz-se sentir mais no clima seco, sendo esta também uma das razões pela qual o grau de saturação demora mais tempo a atingir a unidade nos aterros sujeitos a este clima.

Em profundidade, a influência das condições atmosféricas são suavizadas, passando a ser a capilaridade o efeito predominante devido à presença do lençol freático a 2 m de profundidade (caso base). Como o nível freático se encontra a 2 m de profundidade, a humedificação por

capilaridade faz-se sentir no núcleo apenas para o caso base, pois, no caso do aterro com enrocamento no solo de fundação, é praticamente impossível ocorrer capilaridade.

É, ainda, de notar que, como o aterro não tem uma altura muito relevante (apenas 5 m), a saturação das camadas do mesmo procede-se rapidamente devido aos efeitos de infiltração.

Adianta-se, desde já, um outro aspeto que em muito condicionará o restante desenvolvimento do presente trabalho. Apesar de ser notória uma gradual redução das sucções com o tempo (figs. 31, 32, 50 e 51), sendo a explicação para tal acontecimento apresentada anteriormente, os valores que se registaram para o intervalo temporal no qual a estrutura estará em funcionamento são bastante interessantes e não pode ser de todo ignorado o contributo que estes terão na melhoria das propriedades de resistência e deformabilidade.

6

ANÁLISE MECÂNICA

6.1. INTRODUÇÃO

No campo das infraestruturas ferroviárias, os deslocamentos experimentados no aterro, que suporta a via-férrea, são muito importantes devido às consequências que estes podem gerar. O facto de o aterro sofrer assentamentos pode provocar desnivelamento das vias e deterioração dos carris e das travessas, o que, em grande escala, pode trazer efeitos prejudiciais e custos inaceitáveis.

O principal objetivo da análise mecânica é verificar os assentamentos experimentados pelo corpo do aterro ao longo dos dez anos considerados anteriormente, tendo em conta as variações atmosféricas a que o mesmo está sujeito. Como o objeto de estudo primordial desta dissertação é verificar os efeitos das condições atmosféricas nos aterros, ir-se-ão analisar os assentamentos provocados devido às mudanças atmosféricas. Para tal, após a modelação do aterro no programa *Plaxis*, será utilizada a metodologia da *American Association of State Highway and Transportation Officials*, (AASHTO, 2008), de forma a quantificar os assentamentos experimentados no aterro devido às alterações atmosféricas a que o mesmo está sujeito.

Neste tipo de obras de terra, podem-se verificar assentamentos tanto no corpo do aterro como na sua fundação. Nesta dissertação, apenas se irão analisar os assentamentos experimentados no corpo do aterro. Estes podem ter, essencialmente, três causas:

- peso próprio das terras e respetiva estrutura ferroviária;
- cargas provocadas pelo tráfego dos comboios;
- condições atmosféricas do local, nomeadamente variações de temperatura e humidade.

A última causa é coexistente com as outras duas, isto é, os assentamentos devido ao peso próprio e tráfego são agravados pelas alterações atmosféricas que fazem com que estes assentamentos sejam ainda maiores.

É, ainda, de referir que os assentamentos podem surgir durante a construção da obra e após esta ser colocada em serviço. Neste caso vai-se considerar que aquando da construção, o aterro foi bem compactado e controlado adequadamente, podendo, desta forma, descartar-se os movimentos provenientes de defeitos da construção. Apenas se irão analisar os assentamentos a partir dos 6 meses porque é quando a estrutura ferroviária é colocada em serviço.

6.2. MODELAÇÃO NO PLAXIS2D

Uma vez que esta dissertação é resultado de um trabalho desenvolvido pelo CIMNE na UPC, não foi necessário proceder à modelação deste aterro no *Plaxis*, pois foram fornecidos os resultados de uma análise já elaborada pelos mesmos, retirados deste programa. Assim, foi necessário adaptar numa folha de Excel os resultados obtidos pelo CIMNE para os quatro casos em estudo: caso base e aterro com enrocamento no solo de fundação com os diferentes climas de Antequera (seco) e San Sebastián (húmido).

Neste programa, foram consideradas duas fases de cálculo no programa de elementos finitos: uma primeira, onde se analisam as deformações devido ao peso próprio do solo e uma segunda, onde se “zeram” essas mesmas deformações (de forma a separar os assentamentos devidos ao peso próprio e ao tráfego) e procede-se ao cálculo das deformações devidas ao tráfego.

De forma a simular a construção, foram introduzidas camadas com espessura de 1m, constituídas por material compactado, como se pode visualizar na figura 60. A informação acerca das características dos materiais estão contempladas no capítulo 4 desta tese.

Para realizar o cálculo, considerou-se o modelo de rotura de Mohr-Coloumb e uma análise em condições drenadas.

A geometria e malha utilizada no *Plaxis* apresentam-se seguidamente e tem em conta o carril por onde os comboios circulam, de maneira a ser possível colocar a carga proveniente dos mesmos. O carril encontra-se a 1,6325m do eixo do aterro e mede 1,4325m. Mais uma vez, apenas foi inserido metade do aterro pelas razões já referidas. A malha é composta por elementos triangulares de 15 nós.

A carga aplica-se numa extensão de 1,4325m (largura do carril de um comboio de alta velocidade). O valor da carga por eixo foi retirado do estudo realizado por Ferreira (2011), como será explicado no capítulo 6.3.2.

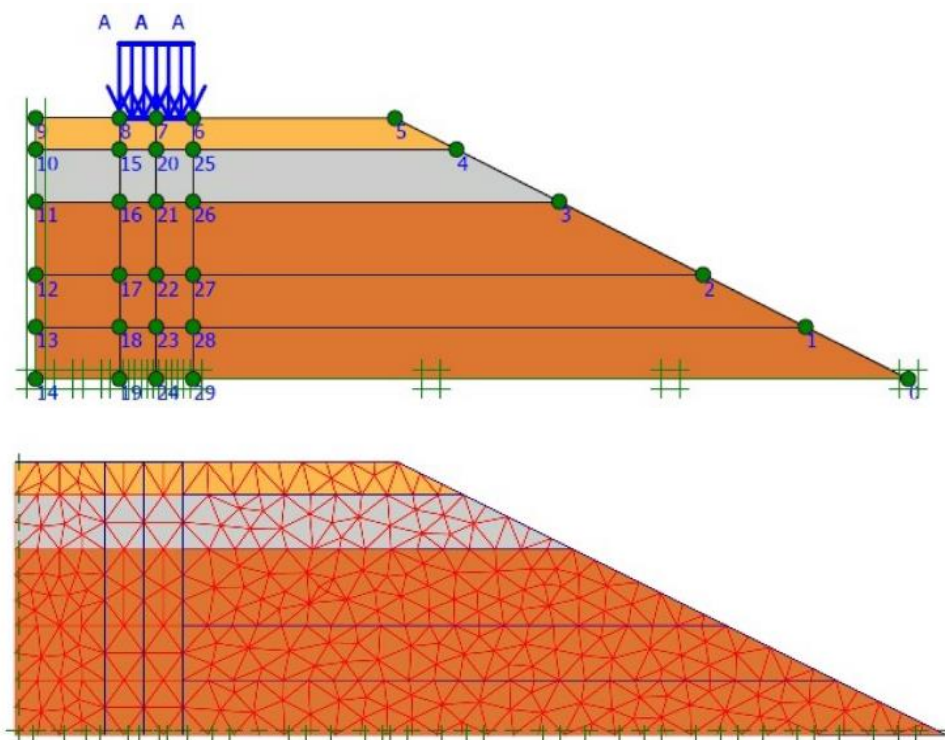


Figura 60 - Geometria e malha utilizadas no *Plaxis*

6.3. METODOLOGIA AASHTO

O guia de projeto AASHTO é uma metodologia de dimensionamento ou reabilitação de pavimentos onde se dá especial importância às condições do local a implantar a obra, nomeadamente tráfego, clima, condição do pavimento existente para reabilitação e às condições de construção. Este dimensionamento ou reabilitação de pavimento já existente é feito com base numa teoria racional-empírica. Esta metodologia pode-se alargar para qualquer tipo de transporte, desde ferroviário a rodoviário.

A perspetiva racional-empírica da metodologia AASHTO passa por, muito simplificada, colocar uma carga pseudoestática que, posteriormente, é amplificada através de leis empíricas de fadiga, de forma a ser transformada numa carga dinâmica equivalente ao tráfego dos comboios. O motivo de se ter seguido este método (AASHTO, 2008), foi o facto deste incorporar as alterações atmosféricas no cálculo destes assentamentos, em particular:

- tem em conta a influência da humidade e da temperatura nos materiais granulares da plataforma, em reposta a ações cíclicas, como é o caso do tráfego dos comboios de alta velocidade. A lei de fadiga tem em consideração, explicitamente, o efeito do clima;
- tem em conta a influência da humidade e temperatura nos materiais granulares da plataforma no seu módulo resiliente;

Uma vez que o guia AASHTO é um documento muito extenso, este estudo apenas se irá focar na parte que contempla as obras de terra ferroviária. Irão ser aplicadas as leis de fadiga da AASHTO (2008), de forma a avaliar os assentamentos produzidos pelas circulações ferroviárias, tendo em conta a influência do clima. O modelo climático deste guia considera dados climáticos, como a temperatura, precipitação, radiação solar, cobertura de nuvens e velocidade do vento. Neste caso, não irá ser utilizado o método AASHTO para calcular as condições termohidráulicas no interior do aterro, porque irão ser utilizados os resultados provenientes da análise termohidráulica realizada no *Code_Bright*, como será explicado com maior detalhe seguidamente. A base desta metodologia consiste em, a partir de leis de fadiga, prever os assentamentos gerados devido às condições atmosféricas, ou seja, os assentamentos que irão ser calculados representam apenas uma parcela incremental que as condições atmosféricas induzem aos assentamentos obtidos no programa *Plaxis*.

6.3.1. ASSENTAMENTOS DEVIDO AO PESO PRÓPRIO

Como mencionado anteriormente, os primeiros assentamentos que se calcularam são os devidos ao peso próprio das terras, considerando já que estas estão bem compactadas e que, como tal, não existirão assentamentos devido a erros construtivos. Neste caso, apenas se obtiveram do *Plaxis* os resultados no eixo do aterro, dado que se verificou que os assentamentos devidos ao peso próprio do material são praticamente constantes na direção longitudinal, à mesma profundidade, para todo o aterro.

Retirou-se, então, as deformações experimentadas no eixo do aterro e, a partir destes valores, calculou-se os assentamentos, tendo em conta os efeitos que a humidade e temperatura provocam no módulo resiliente do solo, recorrendo às expressões apresentadas seguidamente.

Segundo o guia AASHTO (2008), o módulo resiliente varia com um fator ambiental e com o módulo resiliente em condições ótimas:

$$M_r = F_{env} \times M_{r,opt} \quad (15)$$

O módulo resiliente ótimo, $M_{r,opt}$, é o módulo de resiliência em condições ótimas, isto é, para a densidade seca máxima e humidade ótima. No entanto, este fator não é necessário calcular uma vez que a expressão para calcular os assentamentos apenas tem em consideração o fator ambiental como se poderá verificar na equação 18. O fator ambiental é calculado segundo a seguinte expressão:

$$F_{env} = \log \left(\frac{M_r}{M_{r,opt}} \right) = a + \frac{b-a}{1 + \exp \left(\ln \frac{-b}{a} + k_m (S_r - S_{r,opt}) \right)} \quad (16)$$

Este fator é função do tipo de material e do seu estado de saturação. Os valores obtidos na análise hidrotérmica realizada no *Code_Bright* são inseridos na expressão anterior sendo este o parâmetro que permite obter os assentamentos ao longo do tempo (10 anos). Assim, S_r corresponde ao grau de saturação obtido na análise termohidráulica e $S_{r,opt}$ o grau de saturação inicial, isto é, o grau de saturação obtido no *Code_Bright* para o *time step* 0.

O parâmetro “a” representa o mínimo do logaritmo de $(M_r/M_{r,opt})$, “b” o máximo do logaritmo de $(M_r/M_{r,opt})$ e k_m é um parâmetro de regressão. Estes são sempre constantes consoante o tipo de material e estão expressos na tabela seguinte:

Tabela 10 – Tabela 2.3.8 adaptada do guia AASHTO

Parâmetro	Materiais Grosseiros Granulares	Materiais Finos Granulares
a	-0,3123	-0,5934
b	0,3	0,4
k_m	6,8157	6,1324

De forma a calcular o assentamento final total obtido no corpo do aterro, recorreu-se à expressão seguinte que é o somatório dos assentamentos obtidos em todas as camadas em que o aterro foi dividido:

$$RD = \sum_i^{n,sublayer} \varepsilon_p^i \times h^i \quad (17)$$

“RD” é o assentamento final calculado a partir da deformação permanente, “n, sublayer” é o número de camadas do aterro, “ ε_p ” é a deformação plástica total na camada e “h” a espessura da mesma. Esta expressão traduz, então, a lei de fadiga de solos do guia AASHTO 2008 e está descrita no capítulo 3.3 do mesmo e, ainda, no apêndice GG.

A deformação plástica, “ ε_p ”, multiplicada pela espessura da camada, “h”, representa o assentamento da camada, “ δ ”, sendo este calculado pela expressão:

$$\varepsilon_p^i \times h^i = \delta(t) = \frac{1}{F_{env}} \times \varepsilon_v(t_0) \times h \quad (18)$$

Mais uma vez, as variações do grau de saturação que a temperatura e humidade provocam no aterro estão presentes na parcela correspondente ao fator ambiental. As deformações obtidas no programa *Plaxis* são o $\varepsilon_v(t_0)$, que representa a deformação vertical obtida do modelo pseudo-elástico.

Assim, foi possível calcular os assentamentos totais finais devidos ao peso próprio, “RD”, tendo em conta os efeitos que a humidade e temperatura provocam no aterro.

6.3.2. ASSENTAMENTOS DEVIDO AO TRÁFEGO

No caso dos assentamentos provocados pelo tráfego, não se retirou apenas do *Plaxis* as deformações geradas no eixo do aterro. Exportou-se os resultados, verificados em 4 alinhamentos verticais: eixo do aterro, eixo do carril e no alinhamento direito e esquerdo do carril. Isto deve-se ao facto de os maiores assentamentos gerados pela carga se concentrarem na zona dos carris, onde circulam os comboios.

Apenas se considera a atuação da carga provocada pelo tráfego dos comboios após os seis meses, uma vez que é quando a estrutura entra em serviço e, como tal, os comboios começam a circular. O cálculo efetuado no programa *Plaxis* foi um cálculo pseudoestático. Apesar de se saber que os comboios provocam uma carga dinâmica, a metodologia AASHTO permite que se insira uma carga estática equivalente que simula uma carga dinâmica, daí que este seja um cálculo pseudoestático. De forma a simular a carga equivalente estática, multiplica-se uma carga estática por um fator de ajuste. Este é dependente das características da superestrutura e do tipo e número de circulações na via-férrea, no entanto não é do interesse desta dissertação estudar este fator de ajuste, pois o modelo inserido no *Plaxis* já estava anteriormente resolvido. O valor da carga equivalente estática foi retirada do estudo elaborado por Ferreira, 2011, que afirma que o valor da carga por eixo para um comboio de alta velocidade é de 2,4kN/m. Esta foi a carga que se introduziu no programa *Plaxis*, no leito do pavimento do aterro durante a extensão de 1,4325m (largura do carril de um comboio de alta velocidade).

É só de salientar que a eficácia deste modelo está provada pelo estudo realizado por Esmaeli e Yousoufi, (2011).

Finalmente, de forma a calcular os assentamentos finais e permanentes gerados pelo tráfego dos comboios de alta velocidade, recorreu-se à lei de fadiga expressa na equação 17, apesar de, nesta situação, a forma como se calcula a deformação plástica ser diferente. Neste caso, é necessário ter em consideração o número de repetições de carga de tráfego.

A expressão que permite calcular o assentamento devido à deformação plástica é a seguinte:

$$\delta(N) = \beta_1 \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \varepsilon_v h \quad (19)$$

Sendo “N” o número de repetições de carga de tráfego, “ ε_0 ”, “ β ” e “ ρ ” coeficientes de fadiga do material, “ ε_r ” a deformação de referência imposta em laboratório para obter os coeficientes de fadiga, “ ε_v ” a deformação vertical obtida do modelo pseudo-elástico, ou seja, as deformações retiradas do programa *Plaxis*, “h” a espessura da camada e “ β_1 ” um fator de calibração que é distinto, consoante o tipo de material e que pode ser consultado na tabela 12 que se apresenta seguidamente. São, ainda, apresentadas as expressões que permitem calcular os coeficientes mencionados, sendo estas as expressões: 3.3.10a, 3.3.1b, 3.3.10c e 3.3.10d contempladas no guia AASHTO. Uma alternativa será consultar o apêndice GG-1 deste guia.

$$\log \beta = -0,61119 - 0,017638 w \quad (20)$$

$$\rho = 10^9 \left[\frac{C_0}{(1-(10^9)^\beta)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (21)$$

$$\log \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) = \frac{(e^{\rho^\beta \times a_1 E_r^{b_1}}) + (e^{(\rho/10^9)^\beta \times a_9 E_r^{b_9}})}{2} \quad (22)$$

$$C_0 = \ln \left[\frac{(a_1 E_r^{b_1})}{(a_9 E_r^{b_9})} \right] \quad (23)$$

O teor em água, “w”, é calculado a partir da equação 14 descrita no capítulo 5.3.2. É neste parâmetro que se tem em consideração os valores obtidos no cálculo hidrotérmico realizado no *Code_Bright*, pois são utilizados os valores do grau de saturação de forma a calcular o teor em água. É de referir que existe uma expressão no guia AASHTO (3.3.10e) que permite calcular este teor em água, no entanto, neste caso, optou-se por calcular estes valores a partir dos graus de saturação obtidos na análise anterior. “E_r” é o módulo resiliente de cada camada, todavia, neste caso, não foi necessário ter em consideração uma vez que este tem como expoente os valores “b₁” e “b₉” que são nulos, como se pode verificar na tabela seguinte.

Tabela 11 – Valores de alguns parâmetros das expressões 22 e 23

Parâmetro	Valor
a ₁	0,15
a ₉	20
b ₁	0
b ₉	0

Tabela 12 - Parâmetro de calibração para materiais granulares e materiais de subleito.

Parâmetro	Materiais de Subleito	Materiais Granulares
β ₁	1,35	1,673

Para os materiais de leito do pavimento e parte superior do aterro, utilizou-se β_{SG}=1,673 e para os materiais do núcleo β_{GB}=1,35.

Após se calcular o valor do assentamento devido à deformação plástica segundo a expressão 19, recorre-se de novo à expressão 17 de maneira a obter os assentamentos finais do aterro devido ao tráfego por influência das condições atmosféricas.

Finalmente, de modo a estimar o parâmetro “N”, recorreu-se aos estudos realizados por López-Pita et al., 2008. Segundo estes, a carga típica de um comboio de alta velocidade é de aproximadamente 17 toneladas por eixo e cada comboio tem aproximadamente 27 eixos (9 vagões por comboio e 3 eixos por vagão). Consideram, ainda, que, por dia, viajam uma média de 100 comboios de alta velocidade. A partir daqui, pode-se estimar que por ano passam 16,7535 milhões de toneladas por eixo. (Foi feita uma aproximação e considerou-se este valor de tráfego constante durante todos os cálculos).

6.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

De seguida, irão ser apresentados os resultados mais relevantes relativos ao cálculo mecânico pseudoestático, pelo que irão ser analisados os assentamentos experimentados nos aterros para os quatro casos enunciados. É de referir, mais uma vez, que as figuras representam apenas os assentamentos devido às condições atmosféricas a partir dos 6 meses (altura em que a estrutura férrea é colocada em serviço). As expressões do guia AASHTO incluem as deformações que se obtém num programa de cálculo, neste caso o *Plaxis*, o que representa apenas uma parcela incremental que as alterações atmosféricas induzem nos assentamentos obtidos nesse mesmo programa de cálculo devido tanto ao peso próprio como ao tráfego. Os assentamentos obtidos são, então, uma previsão baseada na metodologia AASHTO.

Os assentamentos finais devido às alterações atmosféricas verificados no aterro são fruto dos assentamentos provocados pelo peso próprio das terras e pelas cargas geradas pelos comboios. Estas deformações dão-se nas várias camadas do aterro, sendo, então, os assentamentos totais a soma dos verificados nas três camadas em que o aterro se divide: leito do pavimento, parte superior do aterro e núcleo. Sendo o núcleo a camada inferior, esta é a que suporta mais peso oriundo das camadas superiores, então é expectável que o núcleo seja a camada que experimenta maiores assentamentos. Para além disso, a leito do pavimento e a parte superior do aterro têm apenas 1,6 m no total. Pode-se, também, afirmar que os assentamentos finais são praticamente iguais aos verificados no núcleo, sendo esta camada aquela que mais influencia os assentamentos totais. A figura seguinte vem provar que, efetivamente, os assentamentos totais verificados no aterro são muito próximos dos experimentados pelo núcleo, tendo a leito do pavimento e parte superior do aterro sofrido assentamentos muito reduzidos. Esta figura representa o valor dos assentamentos totais em milímetros experimentados no eixo do aterro. Uma vez que este facto se visualiza em todos os casos estudados (apesar de não ter a mesma ordem de grandeza, o perfil de comportamento é o mesmo), optou-se por representar, aleatoriamente, o aterro com enrocamento no solo de fundação com o clima húmido, mas este é apenas a título exemplificativo.

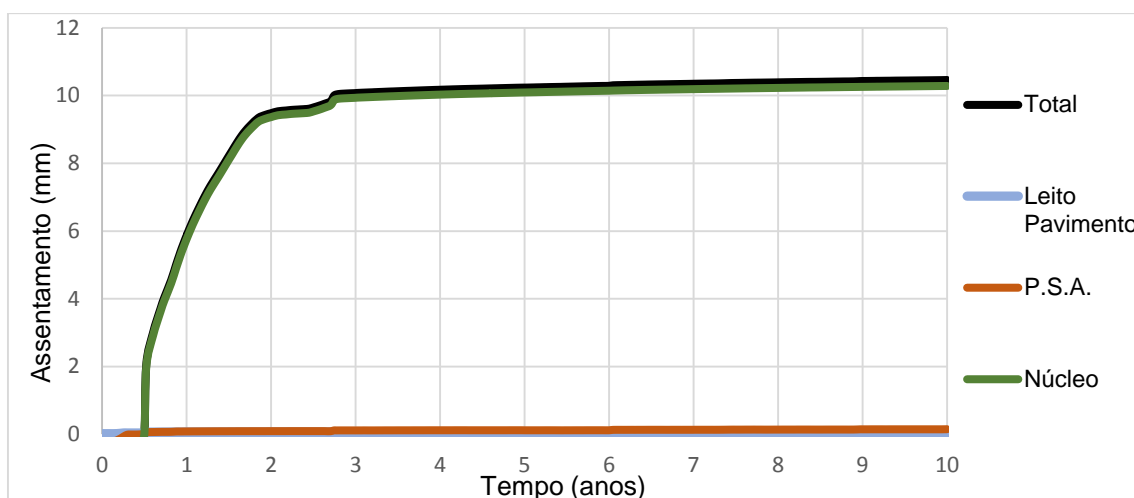


Figura 61 - Assentamentos totais verificados no eixo do aterro com enrocamento sujeito ao clima húmido

De seguida, apresenta-se a figura que expressa o valor dos assentamentos totais provocados exclusivamente pela carga dos comboios em zonas distintas do aterro ao longo de toda a sua altura: eixo do aterro, e zona inferior ao carril (eixo, direita e esquerda). É expectável que seja no eixo do aterro que os assentamentos, devido à carga, sejam menores, dado que esta é a zona que se encontra mais distante do local onde a carga está diretamente aplicada. Por sua vez, o eixo do carril recebe carga oriunda tanto do alinhamento da direita como da esquerda, daí que seja nesta zona onde se verifiquem maiores assentamentos. Na figura, verifica-se também que no alinhamento vertical da esquerda, os assentamentos são ligeiramente superiores (apesar de ser um valor muito pequeno, na ordem dos 0,5 mm) aos verificados no alinhamento da direita. Apesar de ser expectável que o alinhamento da esquerda sofresse tantos assentamentos como o alinhamento da direita, isto não acontece porque o alinhamento da esquerda recebe cargas provenientes da outra metade do aterro (devido à sua condição de simetria) o que implica um ligeiro aumento nos assentamentos aqui observados.

Tal como anteriormente, esta figura, apesar de ser específica do caso do aterro com enrocamento no solo de fundação e clima húmido, representa na generalidade o comportamento verificado nos restantes casos.

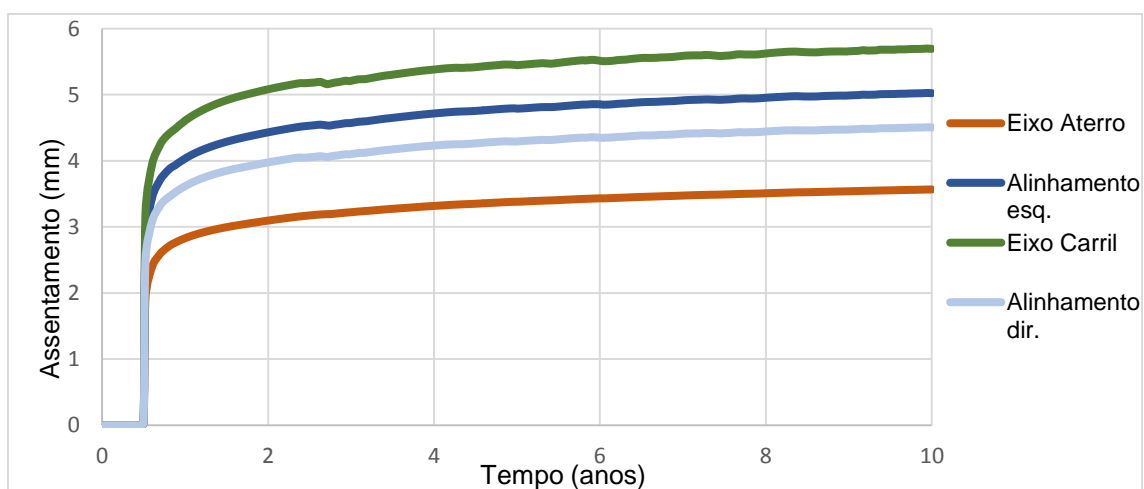


Figura 62 - Assentamentos verificados em várias zonas do aterro devidos tráfego para o aterro com enrocamento sujeito ao clima húmido

6.4.1. ANÁLISE DO CLIMA HÚMIDO

Seguidamente, irá ser feita uma análise dos deslocamentos experimentados por ambos os aterros sujeitos ao clima de San Sebastián, ou seja, clima húmido.

A figura 63 evidencia a evolução dos assentamentos devido ao peso próprio e tráfego no eixo do carril para ambos os casos com o clima húmido. Optou-se por seleccionar estes pontos uma vez que é nesta direcção que se verificam os maiores assentamentos.

Relativamente aos assentamentos provocados pelo peso próprio, verifica-se que estes são bastante superiores no caso do aterro com enrocamento. A explicação disto centra-se no facto de se ter verificado, na análise hidrotérmica, que o aterro que experimenta maiores graus de saturação com este clima é o aterro com enrocamento no solo de fundação. Ora, como o grau de saturação dos diferentes materiais do aterro influencia o cálculo dos assentamentos, era de esperar uma ligeira diferença. Assim, é expectável o que se visualiza na figura seguinte, onde os assentamentos provocados pelo peso próprio são ligeiramente superiores no aterro com enrocamento no solo de fundação. No caso base, verifica-se que os assentamentos gerados pelo peso próprio são inferiores aos provocados pelo tráfego, sendo estes os mais preocupantes, o que não se verifica no aterro com enrocamento, onde os assentamentos provocados pelo peso próprio são superiores aos assentamentos do tráfego.

É de notar que a partir dos 4 anos, os assentamentos do peso próprio, influenciados pelas alterações do clima, tendem a estabilizar. Isto é acontece porque a partir deste ano o núcleo de ambos os aterros começa a ficar completamente saturado e, desta forma, o grau de saturação aproxima-se da unidade e os assentamentos não variam.

No caso dos assentamentos provocados pelas alterações atmosféricas devido ao tráfego, estes são muito semelhantes, daí que as linhas que os representam estejam sobrepostas. Pode-se, então, concluir que as alterações atmosféricas, nomeadamente de temperatura e humidade afetam mais os assentamentos do peso próprio, por isso as diferenças visualizadas.

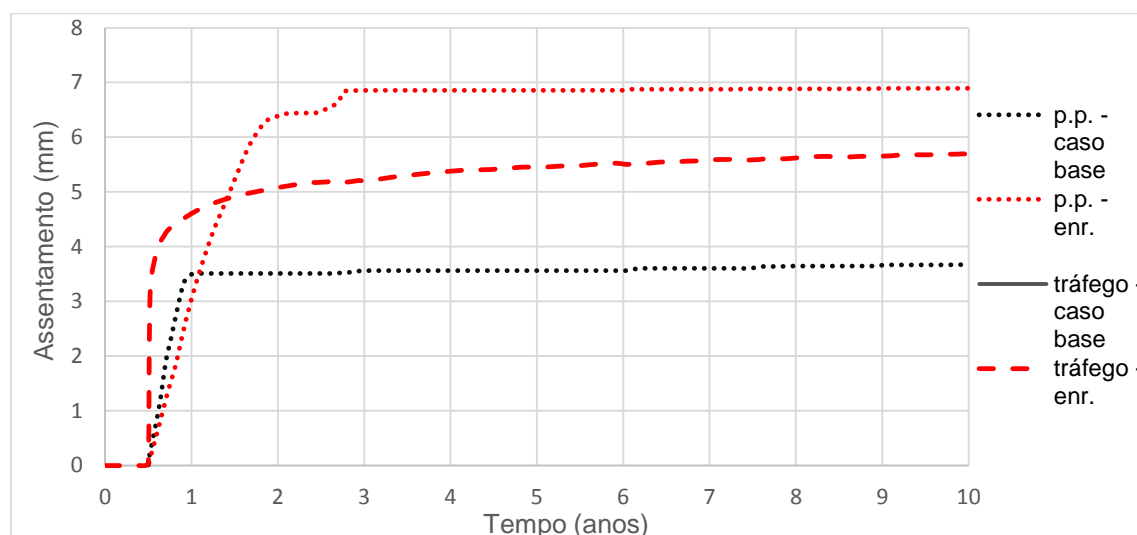


Figura 63 - Evolução dos assentamentos devido ao peso próprio e tráfego no eixo do carril sujeito ao clima húmido

As figuras seguintes representam a evolução dos assentamentos provocados pelas alterações atmosféricas tanto devido ao peso próprio como ao tráfego. A soma dos dois é o assentamento total provocado pelas variações atmosféricas. Como se verifica, o assentamento total é superior no caso do aterro com enrocamento no solo de fundação, isto porque, apesar do assentamento do tráfego ser muito semelhante, o assentamento do peso próprio é superior neste caso. Então, o assentamento total do aterro com enrocamento é 1,5 vezes maior que o assentamento experimentado pelo caso base.

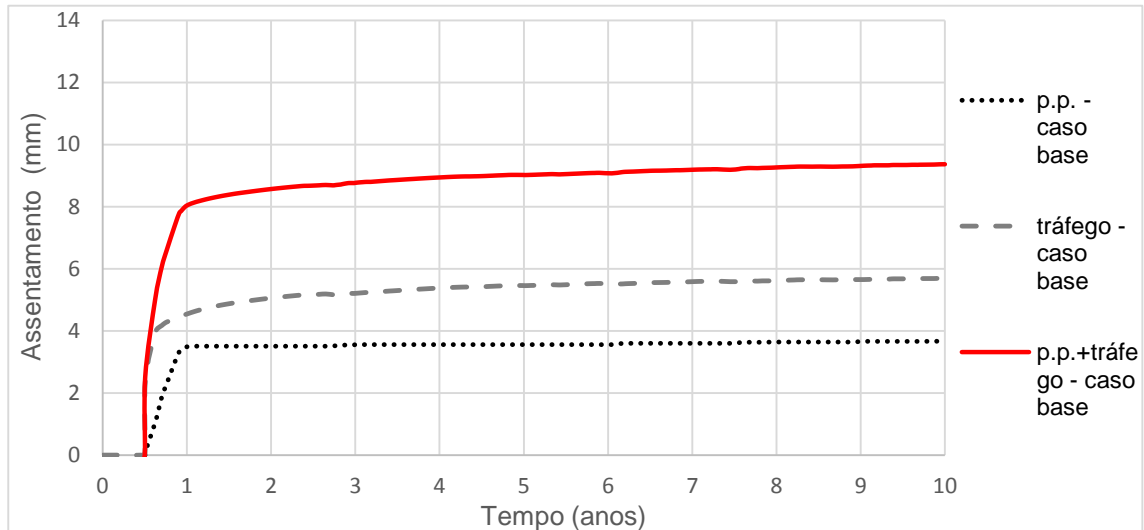


Figura 64 - Evolução dos assentamentos no eixo do carril devido ao peso próprio, tráfego e total para o aterro caso base

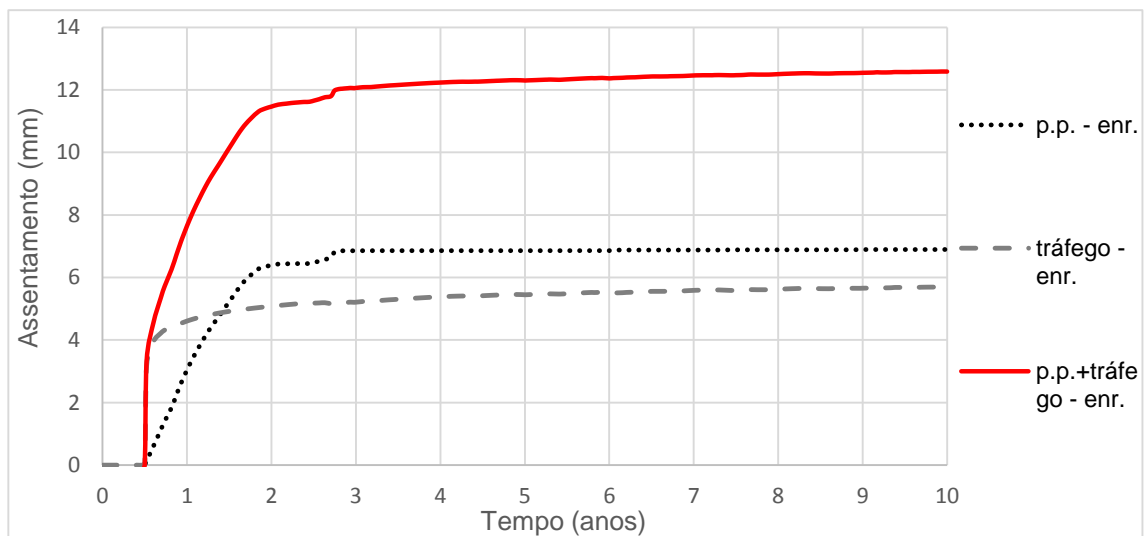


Figura 65 - Evolução dos assentamentos no eixo do carril devido ao peso próprio, tráfego e total para o aterro com enrocamento

6.4.2. ANÁLISE DO CLIMA SECO

Seguidamente, irá ser feita uma análise dos deslocamentos experimentados por ambos os aterros sujeitos ao clima de Antequera, ou seja, clima seco.

Mais uma vez, os assentamentos influenciados pelas condições atmosféricas, devido ao peso próprio, são superiores no aterro com enrocamento.

No caso base, verifica-se uma ligeira estabilização dos assentamentos provocados pelo peso próprio, aproximadamente aos 4 anos porque, tal como verificado na análise hidrotérmica, a partir deste ano o grau de saturação tende a estabilizar. No entanto, a partir dos 9,5 anos há uma ligeira subida deste assentamento, uma vez que o grau de saturação também aumentou a partir desta altura. Isto pode ser explicado pelo facto de neste período haver uma elevada precipitação, como se pode observar nas séries temporais em anexo.

Já no caso do enrocamento, não há uma estabilização dos assentamentos porque, como se verificou na análise anterior, o grau de saturação deste aterro nunca se mantém dentro dos mesmos valores. Com o passar dos anos, há uma tendência do material do núcleo saturar, daí que os assentamentos estejam constantemente a aumentar. A partir dos 9,5 anos, acontece exatamente o mesmo que no caso base com o mesmo tipo de clima. Há um acréscimo súbito do assentamento influenciado pelas alterações atmosféricas devido ao pico de precipitação experimentado nesta altura.

No caso do clima seco, as diferenças de assentamento devido ao peso próprio entre ambos os casos são ligeiramente superiores às diferenças verificadas no caso do clima húmido. Neste caso, o assentamento devido ao peso próprio é 2 vezes maior no caso do aterro com enrocamento.

Quanto aos assentamentos provocados pelo tráfego dos comboios, mais uma vez, as diferenças são tão diminutas que as figuras estão sobrepostos.

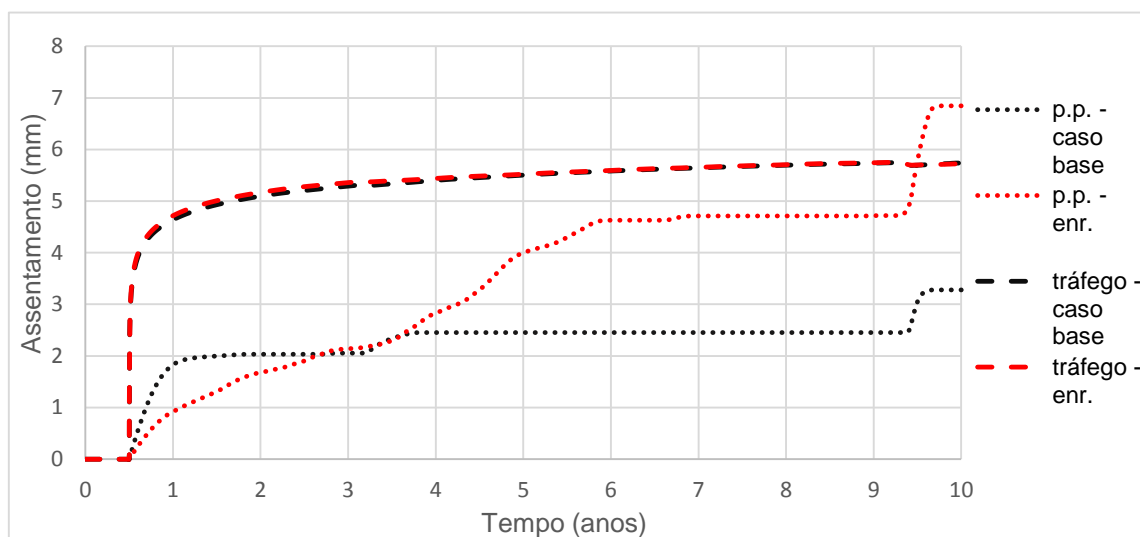


Figura 66 - Evolução dos assentamentos devido ao peso próprio e tráfego no eixo do carril sujeitos ao clima seco

As figuras seguintes representam a evolução dos assentamentos provocados pelas alterações atmosféricas, tanto devido ao peso próprio como ao tráfego. A soma dos dois é o assentamento total provocado pelas variações atmosféricas.

Em ambos estes casos verifica-se que os assentamentos, devido ao peso próprio, são inferiores aos assentamentos por causa do tráfego. Uma vez que o valor dos assentamentos gerados pela carga devido ao tráfego são bastante similares, a maior diferença dos assentamentos totais deve-se, então, ao peso próprio, como se pode observar nas figuras 67 e 68.

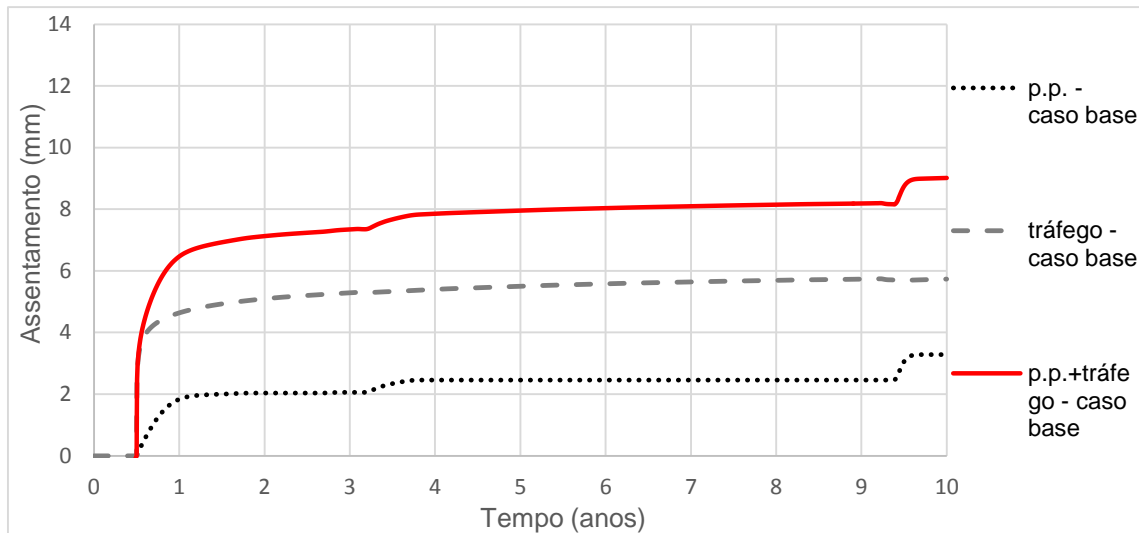


Figura 67 - Evolução dos assentamentos no eixo do carril devido ao peso próprio, tráfego e total para o caso base

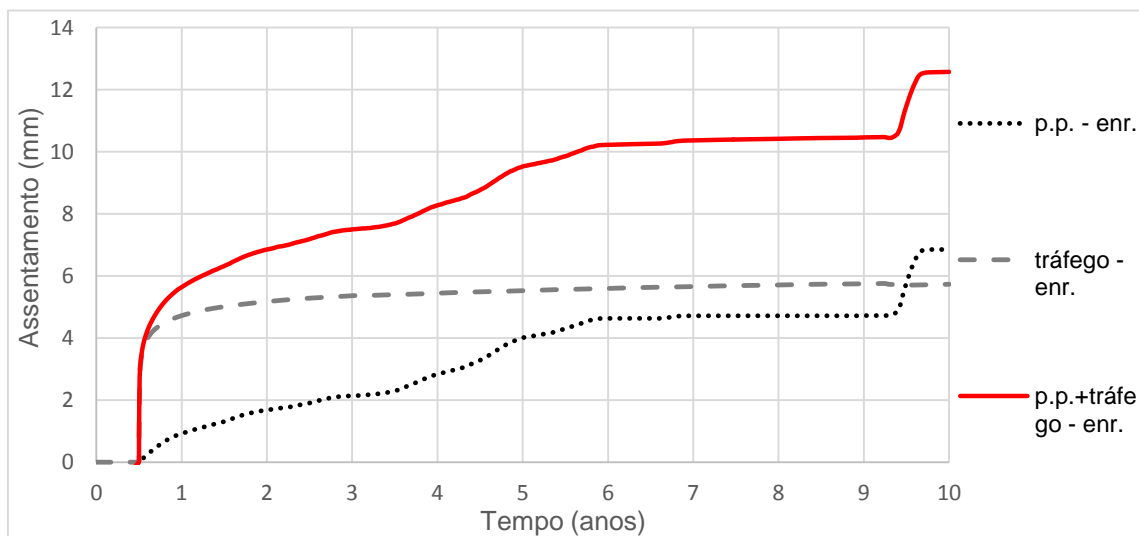


Figura 68 - Evolução dos assentamentos no eixo do carril devido ao peso próprio, tráfego e total para aterro com enrocamento

6.4.3. ANÁLISE GLOBAL

As figuras 69 e 70 evidenciam os assentamentos finais no eixo do carril (local onde os assentamentos são maiores, como se poderá verificar nas figuras 71, 72, 73 e 74) e são representativas dos quatros casos estudados no final de 4 e 10 anos). A laranja estão representados os assentamentos que as alterações atmosféricas provocam devido ao peso próprio e a verde os assentamentos que as alterações atmosféricas provocam devido ao tráfego. A castanho estão os assentamentos totais devido às variações atmosféricas, sendo, então, a soma do verde com o laranja.

Optou-se por mostrar os assentamentos no final de 10 anos por estes representarem os assentamentos finais para o período de tempo analisado. Escolheu-se, também, os 4 anos porque é a partir deste ano que os assentamentos totais nos aterros sujeitos ao clima húmido tendem a estabilizar.

Na figura 69, verifica-se que a partir dos 4 anos, os assentamentos totais experimentados no aterro são bastante similares aos assentamentos experimentados ao fim de 10 anos (com exceção do caso referido anteriormente). No caso do aterro com enrocamento com clima húmido, observa-se que nos primeiros 4 anos o aterro assenta 12,06 mm, enquanto no final de 10 anos assenta 12,58 mm. Isto significa que é nos primeiros 4 anos que o aterro sofre os maiores assentamentos, uma vez que nos últimos 6 anos apenas há uma variação de 0,52 mm. O mesmo acontece no caso base sujeito ao clima húmido, apesar desta diferença não ser tão acentuada. Isto é, nestes dois casos, os maiores assentamentos são experimentados nos primeiros 4 anos, observando-se que nos últimos 6 não há uma variação tão significativa. Nos casos dos aterros sujeitos ao clima seco, verifica-se que aos 4 anos ainda há uma ligeira diferença no assentamento experimentado, quando comparado com o final de 10 anos. No caso do aterro com enrocamento, aos 4 anos apenas se verifica um assentamento total de 7,5 mm, quando no final de 10 anos há um assentamento de 12,57 mm. Isto significa que nos últimos 6 anos há um acréscimo dos assentamentos em 5,07 mm. No caso base, esta diferença não é tão evidente mas, ainda assim, maior que nos aterros sujeitos ao clima húmido. Isto deve-se ao facto do material destes aterros exibir graus de saturação inferiores à unidade aos 4 anos. É, ainda, de salientar que em ambos os aterros que estão sujeitos ao clima seco, como se verificou nas figuras 67 e 68, a partir dos 9,5 anos há um aumento súbito dos assentamentos devido aos picos de precipitação.

Efetivamente, os assentamentos totais são superiores em ambos os casos em que o aterro tem enrocamento no solo de fundação, independentemente do clima. No fim de 10 anos estes tendem a aproximar-se do mesmo valor, 12,5 mm. É expectável que num aterro com as mesmas características, os assentamentos gerados pelas condições atmosféricas tendam a convergir. O mesmo acontece em ambos os aterros “caso base” em que o assentamento final se mantém à volta dos 9 mm.

É, ainda, de notar que no aterro com enrocamento, o assentamento gerado devido ao peso próprio é superior ao do tráfego, tanto no clima húmido como no clima seco. No caso base, acontece exatamente o oposto: o assentamento gerado pelo tráfego é superior ao assentamento provocado pelo peso próprio.

As diferenças visualizadas nos assentamentos finais devem-se, essencialmente, ao assentamento gerado pelo peso próprio, uma vez que os gerados pelo tráfego são da mesma ordem de grandeza (aproximadamente 5,7 mm). Isto deve-se ao facto das leis de fadiga do guia AASHTO serem pouco sensíveis para os níveis de tráfego assumidos nesta análise.

Através da observação desta figura, é notória a desvantagem do uso de enrocamento no solo de fundação, uma vez que os assentamentos finais são aproximadamente 1,3 vezes superiores aos experimentados no caso base. Esta é uma desvantagem fictícia uma vez que nas simulações se

considerou que o nível freático não subia. Caso o nível freático subisse os enrocamentos seriam muito vantajosos uma vez que permitiriam uma facilidade na drenagem.

No caso base, visualiza-se que, efetivamente, os assentamentos totais experimentados pelo mesmo aterro com diferentes climas são da mesma ordem de grandeza. No entanto, através da observação das figuras 64 e 67 verifica-se que há uma estabilização dos assentamentos finais mais rápida no caso do clima húmido. Isto acontece porque o núcleo do aterro do clima húmido satura mais rapidamente que o aterro com clima seco, o que faz com que os assentamentos tendam a estabilizar mais depressa.

No caso do aterro com enrocamento no solo de fundação, os assentamentos finais são também os mesmos. Mais uma vez verifica-se, nas figuras 65 e 68, que há uma estabilização dos assentamentos no caso do clima húmido muito mais rápida que no caso do clima seco. Neste aterro, a estabilização dos assentamentos é ainda mais acentuada que no caso anterior. Por volta dos 4 anos, o aterro que está sujeito ao clima húmido tende a manter os assentamentos na ordem dos 12 mm enquanto o aterro sujeito ao clima seco apenas ao final de 10 anos é que começa a estabilizar. Tal como no caso base, este acontecimento deve-se à saturação do núcleo a partir dos 4 anos (no caso do clima húmido) enquanto o aterro com clima seco, nem ao fim de 10 anos se encontra totalmente saturado (como foi observado na análise termohidráulica).

Também se pode afirmar que não há uma variação muito grande de assentamentos experimentados no mesmo tipo de aterro entre clima húmido e seco porque as séries temporais utilizadas, apesar de representarem diferentes climas, são climas amenos. Isto significa que apesar de no clima de Antequera não chover tanto e as temperaturas não serem tão baixas como em San Sebastián, não são diferenças muito relevantes. O facto é que ambas as localidades pertencem a Espanha e este não é um país com climas glaciares (elevada precipitação e temperaturas muito reduzidas) nem climas áridos (precipitação diminuta e temperaturas elevadas).

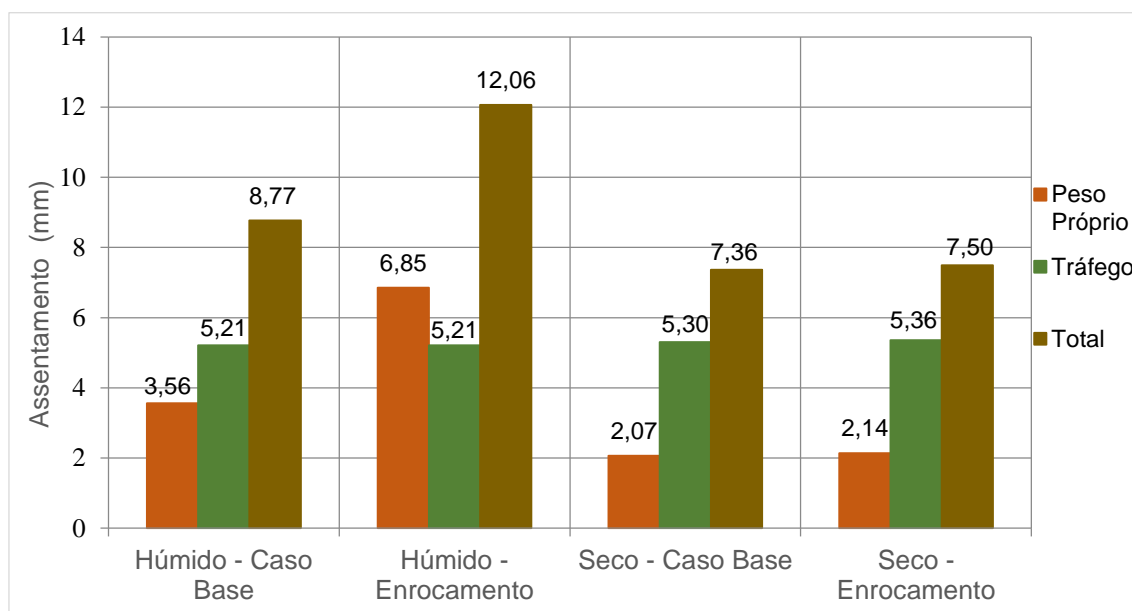


Figura 69 - Comparação dos assentamentos finais para todos os casos analisados aos 4 anos

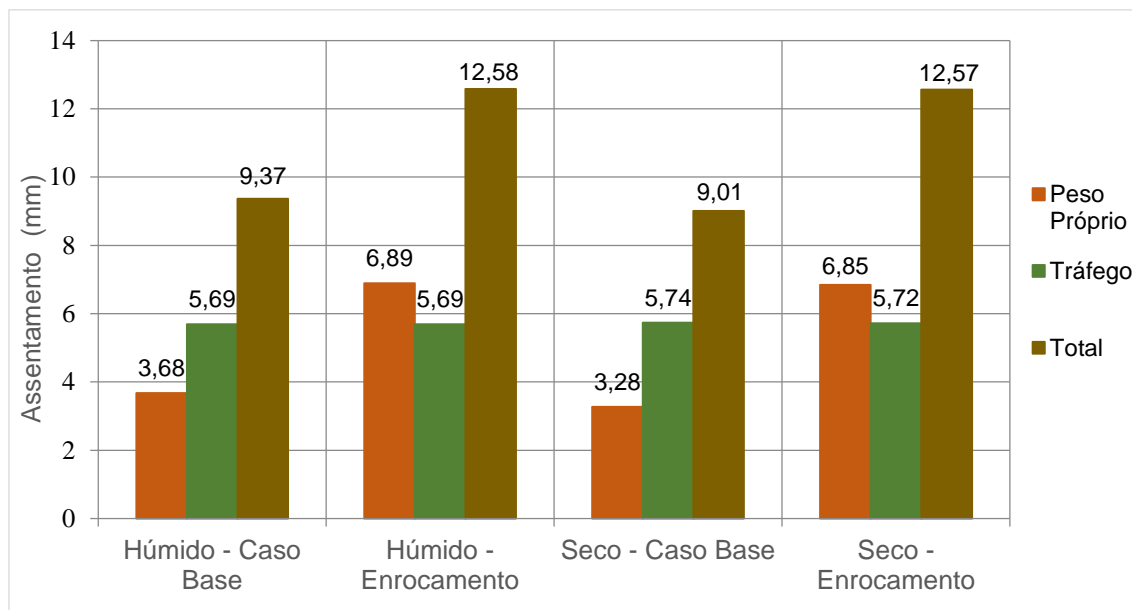


Figura 70 - Comparação dos assentamentos finais para todos os casos analisados aos 10 anos

Nas seguintes figuras, pode-se verificar o perfil de assentamentos experimentados nos quatro aterros devido à alteração das condições atmosféricas aquando da aplicação de uma carga gerada pelos comboios ao longo de vários anos e em diferentes pontos do aterro. Devido à condição de simetria do aterro, optou-se por extrapolar os resultados obtidos de metade do aterro, introduzido nos programas, para a outra metade, de forma a ter uma melhor perceção do perfil de assentamentos experimentado.

Como a carga está aplicada diretamente sobre o carril, era de esperar que os assentamentos fossem superiores nesta zona e inferiores no eixo do aterro. Assim, as consequências nos assentamentos geradas pelas mudanças de temperatura e humidade são mais notórias na direção vertical ao carril da estrutura férrea.

É um facto que as diferenças visualizadas nos diferentes casos estudados são mínimas, sendo o aterro com enrocamento no solo de fundação com clima seco aquele que mais se diferencia dos restantes. Neste, verifica-se que o eixo do aterro assenta, ao fim de 10 anos, 4 mm o que não acontece nos restantes casos (nestes o assentamento final no eixo do aterro é de aproximadamente 3,5 mm). Mesmo que este seja o caso onde se verificam maiores assentamentos no eixo do aterro, pode ser considerado vantajoso, na medida em que reduz o diferencial de assentamentos na direção transversal do aterro. Apesar das diferenças serem mínimas, estes representam apenas a parcela dos assentamentos devido às condições atmosféricas quando aplicada uma carga.

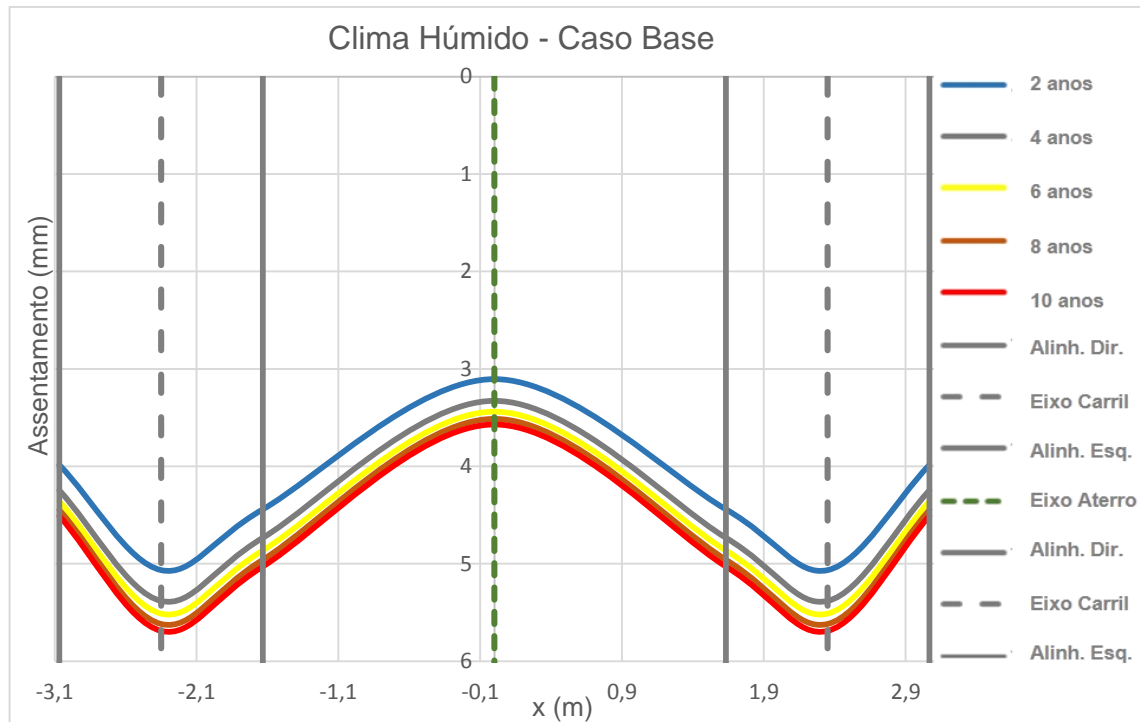


Figura 72 - Assentamentos verificados no aterro devido ao tráfego – aterro caso base sujeito ao clima húmido

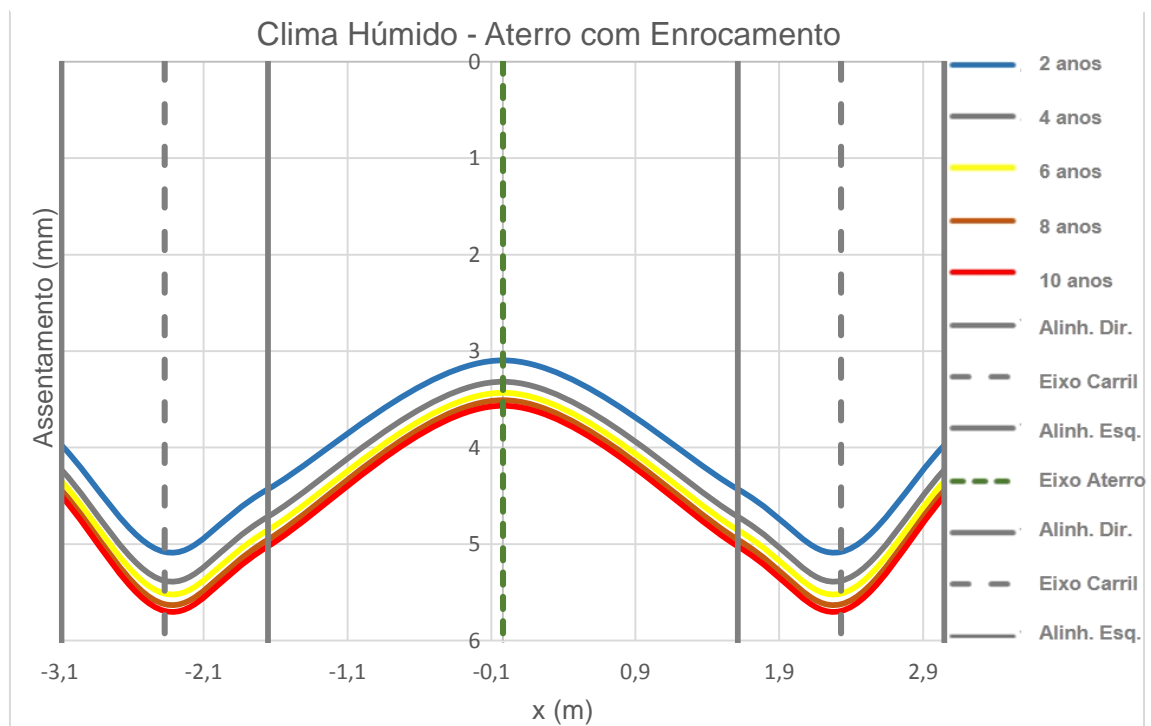


Figura 71 - Assentamentos verificados no aterro devido ao tráfego – aterro com enrocamento sujeito ao clima húmido

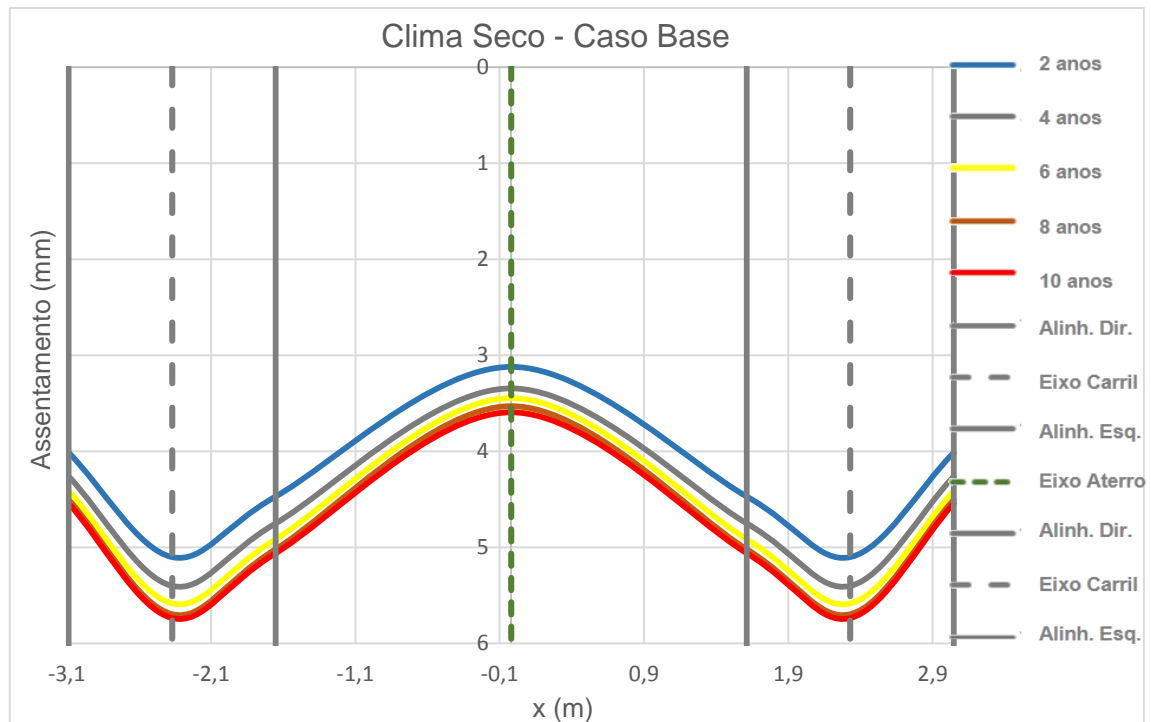


Figura 74 - Assentamentos verificados no aterro devido ao tráfego – aterro caso base sujeito ao clima seco

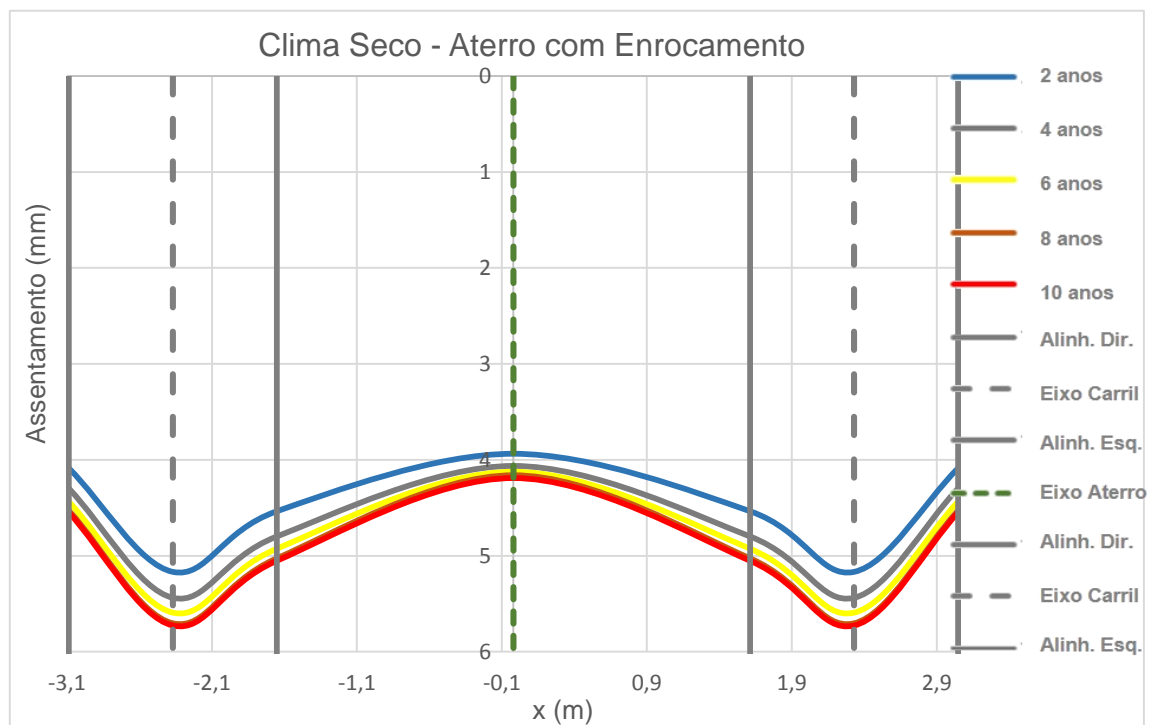


Figura 73 - Assentamentos verificados no aterro devido ao tráfego – aterro com enrocamento sujeito ao clima seco

6.4.4. ESTIMATIVA DOS ASSENTAMENTOS DEVIDOS ÀS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS

Como sugere o título desta dissertação, “Efeitos das Condições Atmosféricas em Aterros Ferroviários”, é interessante estimar a percentagem de assentamento exclusivamente devido às condições atmosféricas. Para tal, comparar-se-á os assentamentos obtidos no programa *Plaxis* com os obtidos através da metodologia AASHTO.

As figuras seguintes expressam os assentamentos experimentados ao longo do eixo vertical do aterro em diferentes pontos do mesmo: eixo do aterro, eixo do carril e alinhamento da direita e da esquerda.

No caso dos assentamentos devido ao peso próprio vai-se comparar os obtidos no programa *Plaxis* com os obtidos na metodologia AASHTO para um período temporal igual a 10 anos. Como se considerou que estes assentamentos não sofrem um incremento com o tempo, concluiu-se que se pode comparar o valor retirado do *Plaxis* com qualquer período temporal. A consideração do intervalo de tempo igual a 10 anos resulta, por um lado, por este valor representar totalidade do período de análise que se adotou inicialmente e, por outro lado, por corresponder ao intervalo onde se observaram as maiores diferenças relativas. Deixa-se a ressalva de que, da consideração da metodologia AASHTO, quanto maior o período temporal em análise maior será o incremento de assentamentos provocados pelas alterações atmosféricas na parcela dos assentamentos devido ao peso próprio.

No caso dos assentamentos devido ao tráfego, ir-se-á comparar os obtidos no *Plaxis* com os da metodologia AASHTO para o tempo de 6 meses. Isto deve-se ao facto de no *Plaxis* se ter introduzido uma carga equivalente à passagem de um comboio, o que corresponde à colocação da via em serviço, ou seja, após 6 meses. Apesar de ser mais interessante verificar a percentagem de incremento de assentamentos devido ao tráfego influenciado pelas condições atmosféricas após 10 anos, isto não se pode fazer porque os assentamentos retirados do programa *Plaxis* correspondem apenas à passagem de um comboio e, como tal, não se pode extrapolar resultados.

Após se visualizar as diferenças obtidas, ir-se-á fazer uma estimativa da percentagem do assentamento total que é devido, exclusivamente, às condições atmosféricas.

É de referir que todas as figuras seguintes se referem ao caso base com clima húmido. Escolheu-se por representar este caso aleatoriamente a título exemplificativo porque o comportamento e tendência dos assentamentos é igual em todos eles. A linha a azul representa os assentamentos calculados através da metodologia AASHTO e, como tal, os assentamentos provocados pelas alterações atmosféricas, enquanto a linha a verde representa os assentamentos calculados através das deformações obtidas no *Plaxis*.

No final, são apresentadas duas tabelas onde se mostra a percentagem que as condições atmosféricas influenciam os assentamentos em todos os quatro casos estudados. É ainda de referir que as deformações retiradas do *Plaxis* devido ao peso próprio são meramente construtivas no entanto, este cálculo da percentagem de incremento de assentamentos devido às alterações atmosféricas apenas tem como objetivo mostrar o valor relativo dos assentamentos construtivos face aos assentamentos devido às alterações atmosféricas.

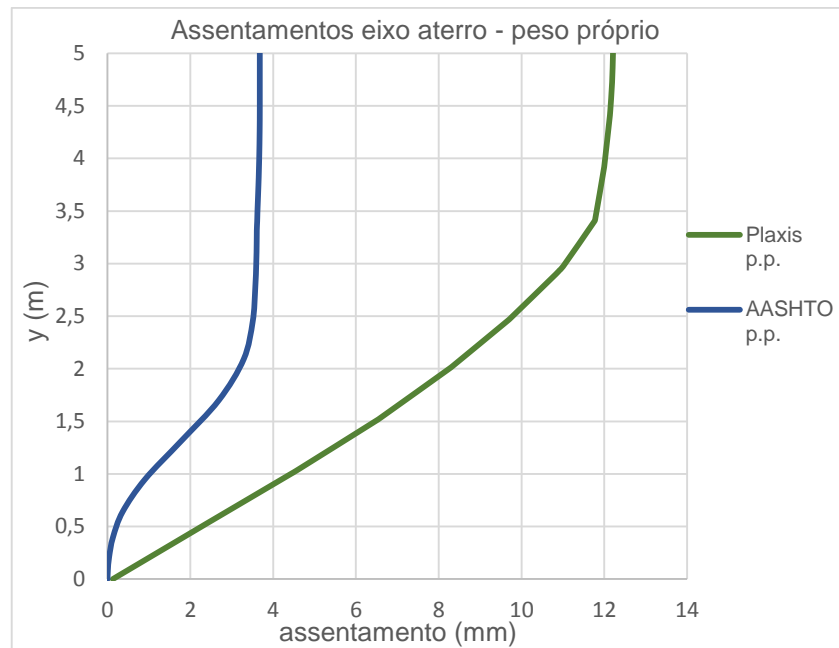


Figura 75 - Assentamentos devido ao peso próprio no eixo do aterro – caso base com clima húmido

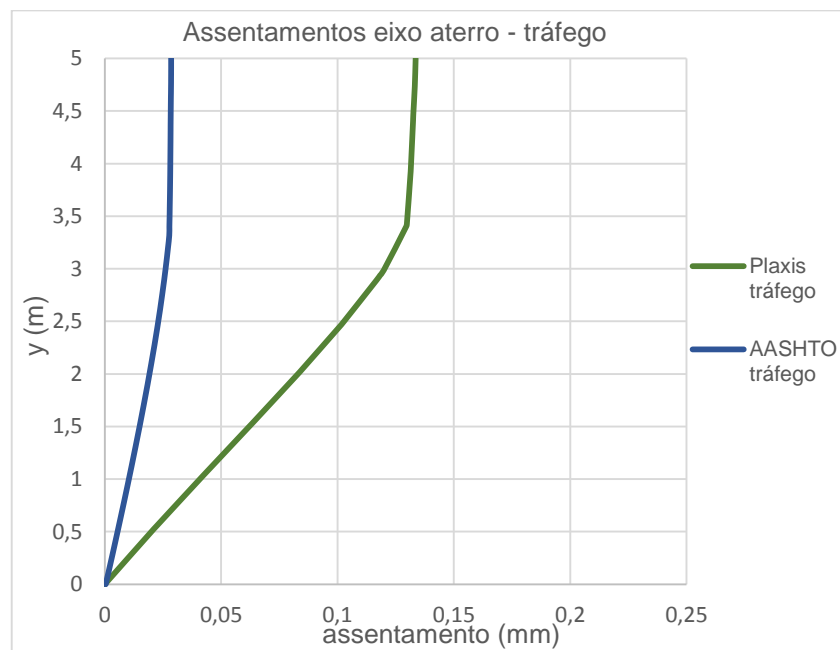


Figura 76 - Assentamentos devido ao tráfego no eixo do aterro – caso base com clima húmido

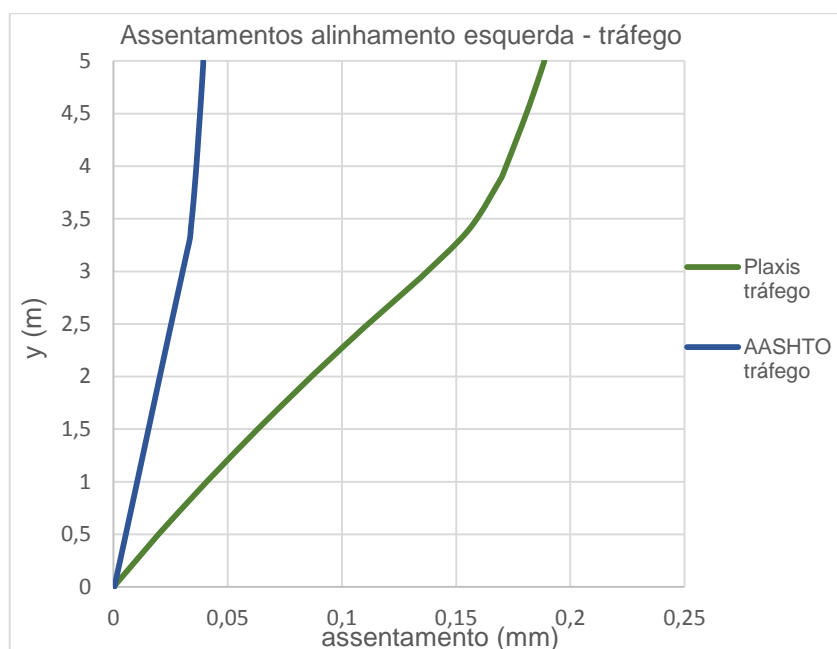


Figura 77 - Assentamentos devido ao tráfego no alinhamento da esquerda – caso base com clima húmido

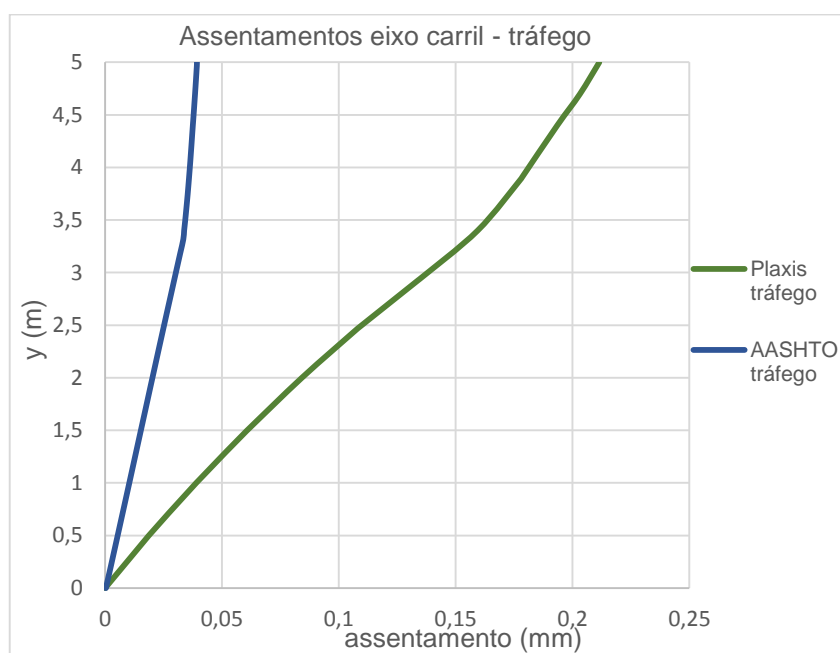


Figura 78 - Assentamentos devido ao tráfego no eixo do carril - caso base com clima húmido

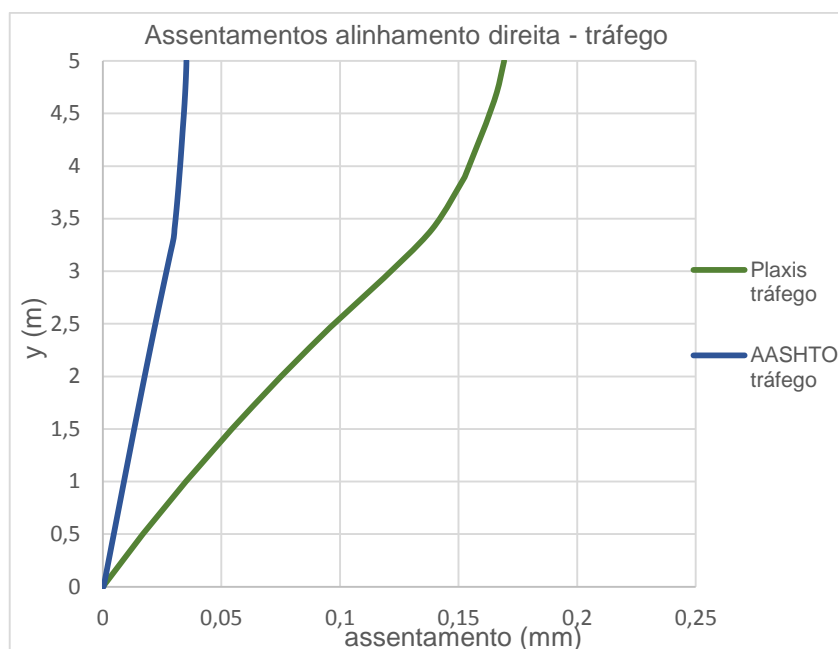


Figura 79 -Assentamentos devido ao tráfego no alinhamento da direita – caso base com clima húmido

A tabela 13 mostra a percentagem de incremento que as alterações atmosféricas, nomeadamente temperatura, humidade e precipitação, provocam nos assentamentos devido ao peso próprio no final de 10 anos. A primeira coluna corresponde ao local de onde os valores foram retirados, neste caso o eixo do aterro; a segunda coluna indica o caso em questão; a terceira coluna os valores calculados através das deformações obtidas no *Plaxis*; a quarta os valores da AASHTO; a quinta é a soma das colunas anteriores, sendo o assentamento total e, finalmente, a última coluna corresponde à percentagem de assentamento que é devido às condições atmosféricas. Verifica-se que essa percentagem é maior no caso do aterro com enrocamento sujeito a ambos os climas.

A tabela 14 evidencia, resumidamente, os assentamentos totais devido ao tráfego, após a passagem de um comboio para os quatro casos em estudo. A primeira coluna indica o caso em questão; a segunda a zona do aterro onde se verifica o assentamento (por exemplo, alinhamento da direita, eixo do aterro, ...); a terceira coluna representa os assentamentos calculados a partir das deformações do *Plaxis*, a quarta os assentamentos calculados pela metodologia AASHTO; a quinta os assentamentos totais, ou seja, é a soma dos dois anteriores. Finalmente, a última coluna evidencia a percentagem de incremento de assentamento que é influenciado pelas condições atmosféricas, sendo o coeficiente entre os assentamentos calculados pela metodologia AASHTO e os totais. Verifica-se que a influência das condições atmosféricas nos assentamentos devido ao tráfego é muito semelhante em todos os pontos extrapolados: eixo do aterro, alinhamento da esquerda e da direita e eixo do carril via. As alterações atmosféricas influenciam em cerca de 17% os assentamentos finais (em todos os casos estudados), como é possível observar na tabela 14.

Tabela 13 - Percentagem de assentamento devido às mudanças atmosféricas nos assentamentos devido ao peso próprio em todos os casos estudados para t=10 anos

		<i>Plaxis</i> (mm)	AASHTO (mm)	Assent. Total (mm)	% AASHTO
Eixo Aterro	Caso Base – clima húmido	12,210	3,677	15,887	23,147
	Enrocamento – clima húmido	12,210	6,892	19,102	36,082
	Caso Base – clima seco	12,210	3,277	15,487	21,162
	Enrocamento – clima seco	12,210	6,846	19,055	35,925

Tabela 14 - Percentagem de assentamento devido às mudanças atmosféricas nos assentamentos devido ao tráfego em todos os casos estudados após a via ser colocada em serviço

		<i>Plaxis</i> (mm)	AASHTO (mm)	Assent. Total (mm)	% AASHTO
Caso Base – clima húmido	Eixo Aterro	0,134	0,028	0,162	17,576
	Alinhamento Esq.	0,189	0,039	0,228	17,239
	Eixo Carril	0,211	0,044	0,255	17,183
	Alinhamento Dir.	0,169	0,035	0,204	17,236
Enrocamento - clima húmido	Eixo Aterro	0,134	0,028	0,162	17,520
	Alinhamento Esq.	0,189	0,039	0,228	17,195
	Eixo Carril	0,211	0,044	0,255	17,144
	Alinhamento Dir.	0,169	0,035	0,204	17,193
Caso Base - clima seco	Eixo Aterro	0,134	0,028	0,162	17,540
	Alinhamento Esq.	0,189	0,039	0,228	17,212
	Eixo Carril	0,211	0,044	0,255	17,149
	Alinhamento Dir.	0,169	0,035	0,204	17,207
Enrocamento - clima seco	Eixo Aterro	0,134	0,026	0,160	16,419
	Alinhamento Esq.	0,189	0,039	0,228	17,168
	Eixo Carril	0,211	0,044	0,255	17,111
	Alinhamento Dir.	0,169	0,035	0,204	17,159

6.4.5. CONCLUSÕES

Antes de mais, é necessário concluir que, efetivamente, colocar enrocamentos no solo de fundação não acarreta qualquer tipo de vantagem face aos assentamentos influenciados pelas condições atmosféricas verificados. Isto significa que no caso base se obteve assentamentos menores do que no aterro com enrocamento, independentemente do tipo de clima. Com isto, conclui-se que as alterações das condições atmosféricas, como a temperatura, precipitação e humidade, afetam visivelmente mais este último aterro, o que provoca maiores assentamentos. É de referir, mais uma vez, que esta é uma desvantagem fictícia na medida em que nas simulações realizadas não se alterou a posição do nível freático.

Os tipos de clima estudados, Antequera e San Sebastián, provocam diferenças nos resultados visualizados relativamente aos assentamentos devido ao peso próprio. Nos primeiros anos, os aterros sujeitos ao clima húmido sofrem maiores assentamentos que os aterros sujeitos ao clima seco. No entanto, a magnitude do assentamento final é muito similar entre os mesmos aterros sujeitos a diferentes climas. Isto significa que quando se aumenta o período temporal em estudo, os assentamentos, devido às alterações atmosféricas, tendem a convergir, independentemente do clima em causa.

No caso do clima húmido, apesar dos assentamentos se desenvolverem mais rapidamente, estes também estabilizam a uma velocidade superior, quando comparado com o clima seco. Isto significa que, no clima seco, quando há período de chuva moderada, há uma estabilização aparente dos assentamentos, no entanto, quando subitamente aparece um período de elevada precipitação, os assentamentos aumentam abruptamente. Assim, o tempo húmido, apesar de respostas mais céleres, apresenta também uma maior previsibilidade.

Quanto aos assentamentos devido ao tráfego, estes são muito semelhantes em todos os casos estudados.

7

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÕES

De entre as inúmeras técnicas de melhoramento do solo de fundação, esta tese focou-se no estudo concreto dos enrocamentos. Os enrocamentos surgem de forma a melhorar o comportamento do solo, substituindo-o por materiais mais grosseiros, facilitando a drenagem devido à dimensão dos vazios e por funcionarem como barreiras hidráulicas, evitando a ascensão de água por capilaridade. Como a análise realizada no presente trabalho se focou, essencialmente, nos efeitos que as mudanças atmosféricas provocam nas obras de terra ao nível de assentamentos, verificou-se que a este nível os enrocamentos não trazem qualquer tipo de vantagem.

Em relação ao comportamento hidráulico, verificou-se que os enrocamentos funcionam praticamente e paradoxalmente como se fossem uma barreira hidráulica, uma vez que a quantidade de água que entra pela base do mesmo é muito reduzida. Também se concluiu que os enrocamentos são vantajosos no clima seco, na medida em que retardam a saturação do núcleo do aterro. Através da figura 58 verificou-se que os aterros sujeitos ao clima seco com enrocamentos no solo de fundação ficam completamente saturados apenas após 10 anos. Até aos primeiros 5 anos, visualizou-se uma diferença significativa do grau de saturação entre o caso base e o aterro com enrocamento, tendo o caso base um grau de saturação bastante superior. Já no clima húmido, verificou-se o oposto, ou seja, é no aterro com enrocamento que o grau de saturação atinge primeiro a unidade. Com este clima, as diferenças entre os dois casos estudados não são significativas.

Relativamente à análise mecânica, efetivamente, os enrocamentos poderiam reduzir os assentamentos totais experimentados pelos aterros destinados a estruturas ferroviárias. No entanto, os assentamentos devido ao peso próprio, provocados pelas alterações atmosféricas após um grande período de tempo, são superiores no caso do aterro com enrocamento no solo de fundação. Ora, como os assentamentos finais devido às alterações atmosféricas são o somatório dos assentamentos devido ao peso próprio com os devido ao tráfego e como os do tráfego são pouco afetados pelas alterações atmosféricas, verificou-se que, no caso dos aterros com enrocamento, os assentamentos finais devido às alterações atmosféricas são sempre superiores.

Verificou-se que para um período longo (10 anos), os assentamentos que os aterros experimentam devido às alterações atmosféricas são muito semelhantes para o mesmo tipo de aterro quando sujeito a diferentes climas. Com isto quer-se dizer que o caso base estudado, ao fim de 10 anos, experimentou um assentamento de 9,37 mm quando sujeito ao clima húmido e 9,01mm para o clima seco. Já o aterro com enrocamento sofreu um assentamento de 12,58mm quando exposto a um clima húmido e de 12,57 mm quando exposto a um clima seco. Estes dados podem ser

verificados na figura 70. Assim, pode-se concluir que os aterros com enrocamentos, no final de 10 anos, sofrem maiores assentamentos provocados pela alteração de humidade, temperatura e precipitação comparativamente ao caso base.

É, ainda, de notar que esta diferença não é tão nítida no caso de ambos os aterros expostos ao clima seco para um período de tempo menor. Na figura 69, verificou-se que, após 4 anos da plataforma ter sido colocada em serviço, os assentamentos experimentados por ambos os aterros são bastante parecidos: 7,36 mm para o caso base e 7,50 mm para o aterro com enrocamento. Esta diferença já é bastante mais notória quando estes são expostos a um clima húmido.

Apesar de estes resultados não serem de todo expectáveis, é de salientar, mais uma vez, que o resultado final dos assentamentos são apenas devidos às alterações atmosféricas. É necessário ter em atenção que estes assentamentos são apenas uma parcela que se tem de somar aos assentamentos que os aterros experimentam devido ao peso próprio, tráfego e erros construtivos sem a influência das condições atmosféricas.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Após a finalização deste trabalho, há inúmeras questões que se levantam e que seria muito interessante tentar solucioná-las. Por um lado por limitação de tempo e por outro pela temática da própria tese, houve algumas questões que surgiram durante a realização da mesma que tiveram de ficar por responder por se afastarem ligeiramente dos objetivos iniciais. Obviamente que numa fase posterior poder-se-iam analisar, com maior pormenor, vários dos temas abordados.

Assim, um dos primeiros trabalhos a realizar seria o de introduzir no modelo do *Code_Bright* uma nova camada de solo correspondente à fundação do aterro e introduzir os seus parâmetros mecânicos e hidráulicos ao invés de utilizar o artifício de cálculo através da condição de fronteira utilizada. Para tal, seria necessário realizar ensaios laboratoriais no material de enrocamento de forma a obter as suas características, nomeadamente a curva de retenção deste.

Um outro estudo estimulante seria o de realizar o cálculo termo-hidro-mecânico no programa *Code_Bright*, uma vez que este permite uma análise acoplada, tendo em conta as séries temporais já utilizadas. Teria todo o interesse comparar os resultados obtidos neste cálculo com os resultados desta dissertação, de forma a validar a metodologia proposta no guia AASHTO no cálculo destes assentamentos.

Após isto, poder-se-iam verificar os assentamentos totais experimentados pelo aterro com enrocamento sem ter em consideração as alterações atmosféricas e, assim, verificar se os enrocamentos são ou não vantajosos face a estes assentamentos.

Seria também interessante efetuar o estudo dos assentamentos devido ao tráfego, utilizando a metodologia AASHTO (tal como o realizado nesta tese) mas em vez de se adotar o parâmetro “N” (número de repetições de carga de tráfego) como constante, fazer este variar ao longo de um ano, isto é, estudar o número de comboios de alta velocidade que passam por dia numa determinada região e assim calcular os assentamentos com o número exato de comboios por ano.

Finalmente, um dos grandes desenvolvimentos futuros que estaria completamente relacionado com esta dissertação seria instrumentar e observar no campo os assentamentos durante um determinado período de tempo e compará-los com os resultados teóricos. Assim, poder-se-iam validar as análises feitas e evitar erros futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADIF (2011). *Pliego de Prescripciones Tecnicas Tipo para los Proyectos de Plataforma*. PGP Versão 1 aprovada a 30 de Junho de 2011.
- ADIF (2011b). IGP-1.2 *Recomendaciones sobre las Cunas de Transicion*. Normativa Técnica ADIF.
- ADIF (2012). *Pliego de Prescripciones Tecnicas Tipo para los Proyectos de Plataforma*. PGP Versão 2, aprovada em 1 de Junho de 2012.
- Alonso, E.E. (1998). *Suction and moisture regimes in roadway bases and subgrades*. Simpósio Internacional: Drenaje Interno de Firmes y Explanadas, pp. 57-104, Granada, Espanha.
- Amaral, M. (2012). *Caraterização e Modelação de Comportamento Dinâmico e Cíclico de Misturas de Solo-Cimento para Infraestruturas de Transportes*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- AASHTO (2008). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*. Interim Edition: A Manual of Practice. American Association of State and Highway Transportation Officials / 01-Jul-2008 / 212 pages.
- Brazão, J. (2011). *Aterros Ferroviários de Misturas de Solo e Enrocamento*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- Dammacco, R. (2000). *Studying the interaction between liquid, gas and heat flows in a soil under evaporation conditions by means of numerical modeling*. Dissertação de Mestrado.
- Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica I Geofísica. *Code_Bright Tutorial Manual*. Agosto 2010.
- Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica I Geofísica. *Code_Bright User's Guide*. Junho 2013.
- ECAD. <http://eca.knmi.nl/>.
- Esvelde, C. (2003). *Developments in High-speed track design*. Delft University of Technology, Netherland.
- Ferreira, T. M., Teixeira, P. F. and Cardoso, R. (2011). *Impact of Bituminous Subballast on Railroad Track Deformation Considering Atmospheric Actions*. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 137(3), 288-292.
- Ferreira, T. M. & Teixeira, P. F. (2012). *Rail Track Performance with Different Subballast Solutions: Traffic and Environmental Effects on Subgrade Service Life*. Journal of Transportation Engineering, 138(12), 1541-1550.
- Fortunato, E. (2005). *Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Fredlund, D. G. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, inc., Canada.
- Fredlund, D. G. (2006). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. San Diego.
- Fredlund, D. G.; Morgenstern, N. R.; Widger, R. A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 15, N. 3, páginas 313-321.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, inc.

International Union Of Railways. High Speed Department (2008). Design of New Lines for Speeds of 300 – 350km/h. State of the Art, páginas 20 – 21.

IFAPA. <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria/servlet/FrontController>.

IPMA e AEMET (2011). *Atlas Climático Ibérico*. Editado pela Agência Estatal de Meteorologia do Ministério do Meio Ambiente, Meio Rural e Marinho com a colaboração do Instituto Português de Meteorologia.

Janssen, D. J.; Dempsey, B. J. (1980). Soil-moisture properties of subgrade soils. 60th Annual Transportation Res. Board Meeting, Washington, DC.

Koppen W. (1936). *Das geographische System der Klimate. Handbuch der Klimatologie*. Bd. 1, Teil C.

Leroueil, S., Hight, D. W. (2013). *Compacted soils: From physics to hydraulic and mechanical behaviour*. Taylor & Francis Group, London.

Li, H., Jones, D. and Harvey, J. (2012). *Development of Mechanistic-Empirical Design Procedure for Fully Permeable Pavement Under Heavy Traffic*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2305. Washington.

López-Pita, A., Teixeira, P., Casas, C., Bachiller, A., and Ferreira, P. (2008). Maintenance costs of high-speed lines in Europe: State of the art. Transportation Research Record 2043, Transportation Research Board, Washington, DC, 13 – 19.

Lu, N., Likos, W. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, inc, New Jersey.

Mancuso, C., Jommi, Cristina and D’Onza, F. (2012). *Unsaturated Soils: Research and Applications. Volume 2*. Springer, London.

Marinho, F. (2005). *Os Solos Não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados*. Texto apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para o Concurso de Livre-Docência na especialidade “geomecânica” do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações.

Michas (2012). *Slab Track Systems for High-Speed Railways*. Dissertação de Mestrado, Department of Transport Science, School of Architecture and the Built Environment, Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.

Ng, Charles, Menzies, Bruce (2007). *Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering*. Taylor & Francis, New York.

Olivella, S., Gens, A., Carrera, J., Alonso, E. (1996). *Numerical Formulation for a Simulator (CODE_BRIGTH) for the Coupled Analysis of Saline Media*. Engineering Computations, Vol. 13, No 7, pp. 87-112.

Olivella, S., Vaunat, J., Garitte, B., Pinyol, N. (2008). *Coupled THM problems in geotechnical engineering using Code_Bright – GiD*. Proc. 4rd GiD Conference, Ibiza, Spain, pp. 10.

Olivella, S., Vaunat, J. (2006). *Application of Code_Bright – GiD to geotechnical problems*. Proc. 3rd GiD Conference, Barcelona, Spain, pp.10.

Proyecto Fastrack (2013), Módulo D-2. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica de la Universidad de Málaga e Universidad Politécnica de Cataluña.

Rondón, H.A., Reyes, F. (2009). *Deformación Permanente de Materiales Granulares en Pavimentos Flexibles: Estado del Conocimiento*. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Redalyc, versión 1692-3324, Colombia.

Scott, J. M., Loveridge, F. and O'Brien, A. S. (2007). *Influence of climate and vegetation on railway embankments*. XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid.

Soil Water Retention. http://age-web.age.uiuc.edu/classes/age357/ABE459_08/html/Soil%20Water%20Retention.pdf. 2014-03-27.

UIC (2008). *Earthworks and track bed for railway lines*. UIC 719R. Fevereiro 2008. Ficha UIC.

Universidade de Málaga, Grupo de Investigación HUM-064 (2013), Entregable E.1.1: *Definición de las técnicas de mejora del terreno requeridas en la subestructura ferroviaria por el nuevo sistema de vía en placa*, Málaga, Universidade de Málaga.

Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Gran Capitán s/n. Módulo D-2, Universidad de Málaga. Proyecto Fastrack, Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña.

Van Genuchten M T (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science American Journal 44, 892-898.

Viana da Fonseca (1998). *Mecânica de Solos Não Saturados*. Texto de Apoio às aulas de "Teoria de Resistência ao Corte e da Deformação" do Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 70 págs. FEUP, Porto.

Washburn, E.W. (1921). *The dynamics of capillary flow*. Phys. Rev., 17, 273-283.

Zapata, C.E., Andrei, D., Witczak, M.W. and Houston, W.N. (2007). *Incorporation of environmental effects in pavement design*. Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona State University, U.S.A.

Zuo, G., Drumm, E. C. and Meier, R. W. (2007). *Environmental Effects on the Predicted Service Life of Flexible Pavements*. Journal of Transportation Engineering, vol. 133.

ANEXOS

SÉRIES ATMOSFÉRICAS DE SAN SEBASTIÁN E ANTEQUERA

I. SAN SEBASTIÁN: 2000 A 2009

1. TOTAL DA PRECIPITAÇÃO POR DIA

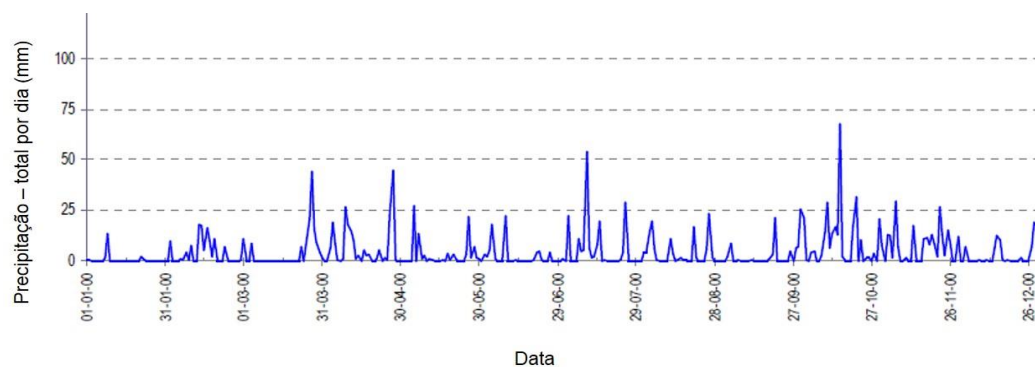


Figura 80 - Precipitação total por dia - ano 2000

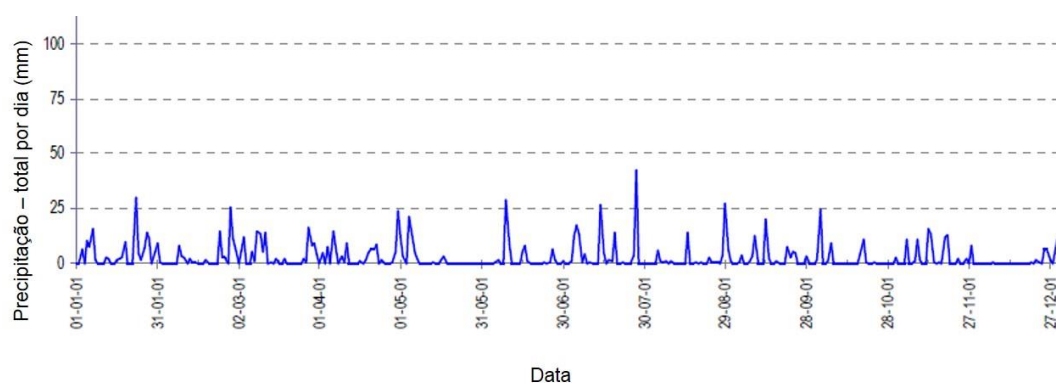


Figura 81 - Precipitação total por dia - ano 2001

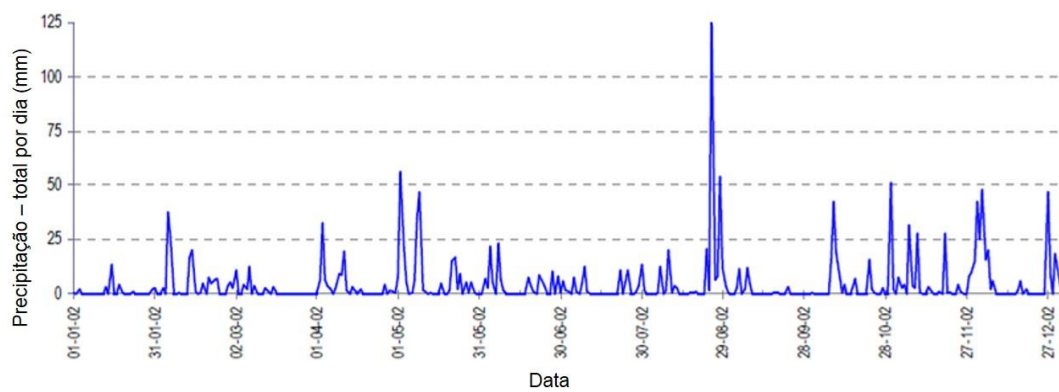


Figura 82 - Precipitação total por dia - ano 2002

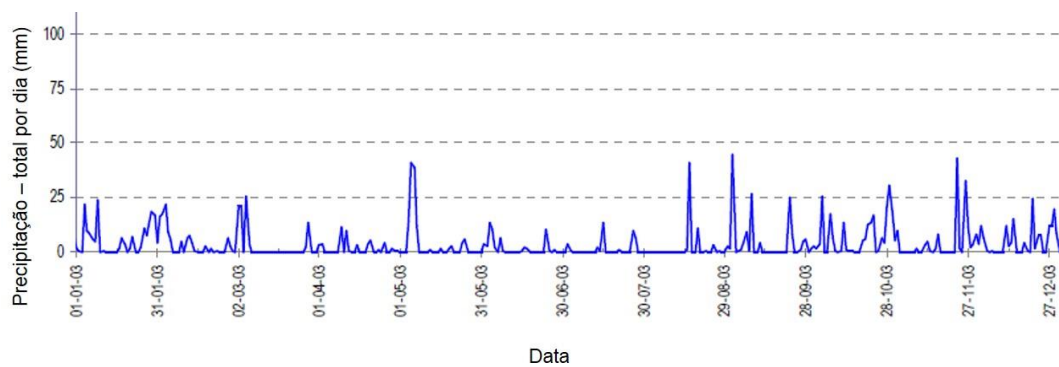


Figura 83 - Precipitação total por dia - ano 2003

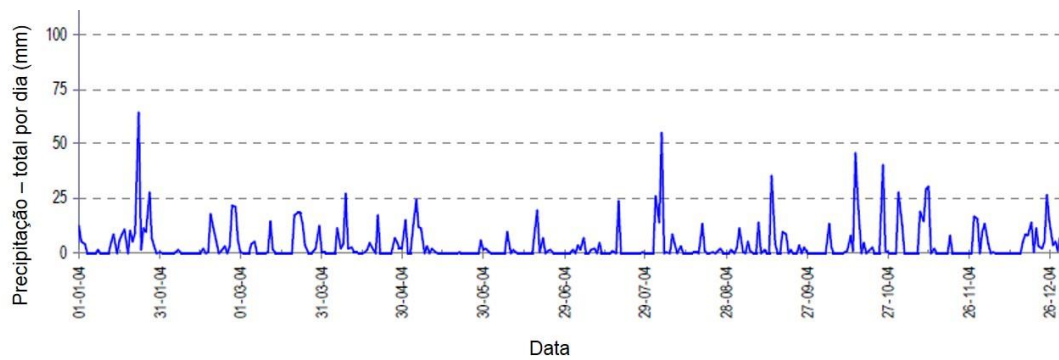


Figura 84 - Precipitação total por dia - ano 2004

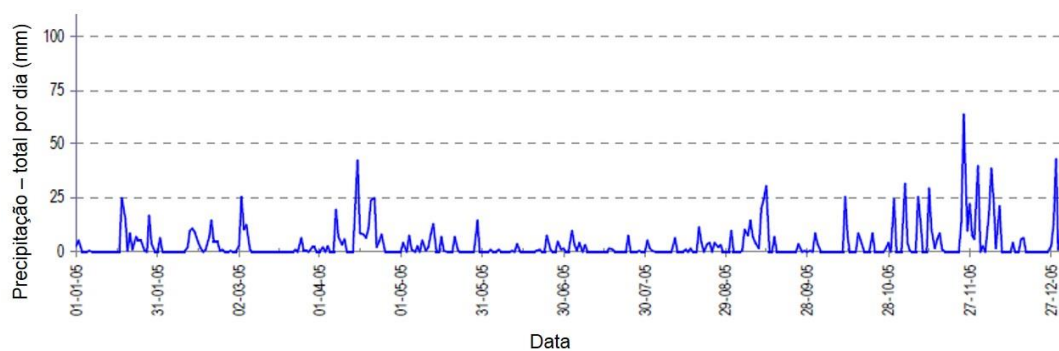


Figura 85 - Precipitação total por dia - ano 2005

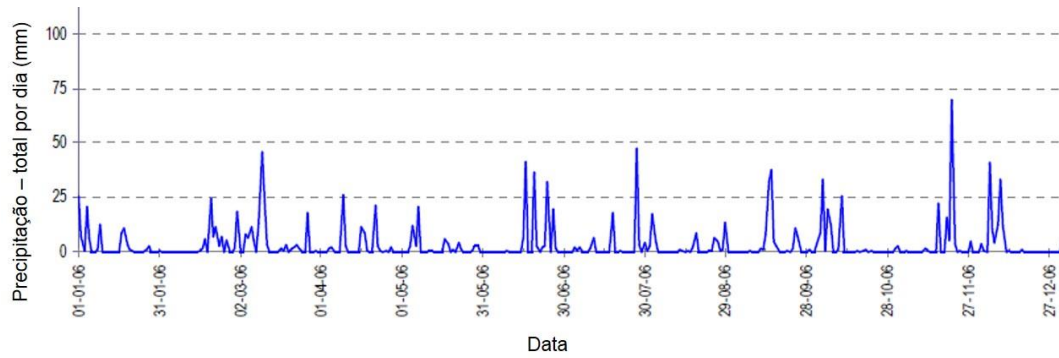


Figura 86 - Precipitação total por dia - ano 2006

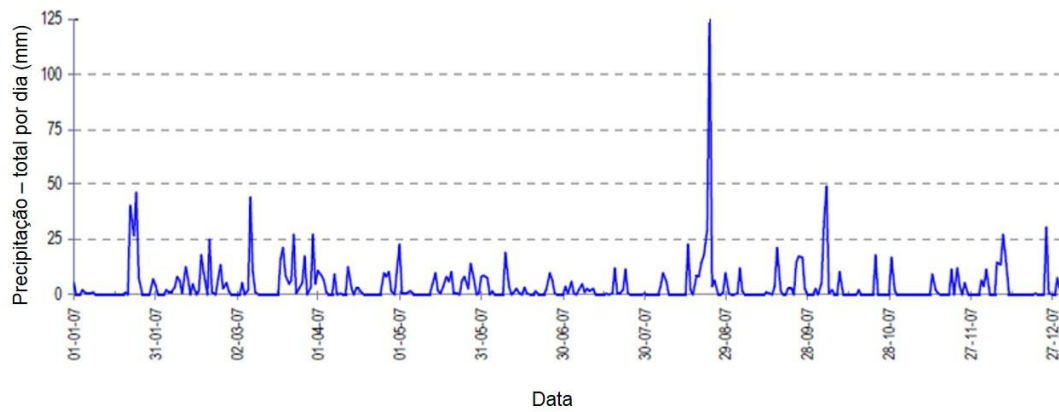


Figura 87 - Precipitação total por dia - ano 2007

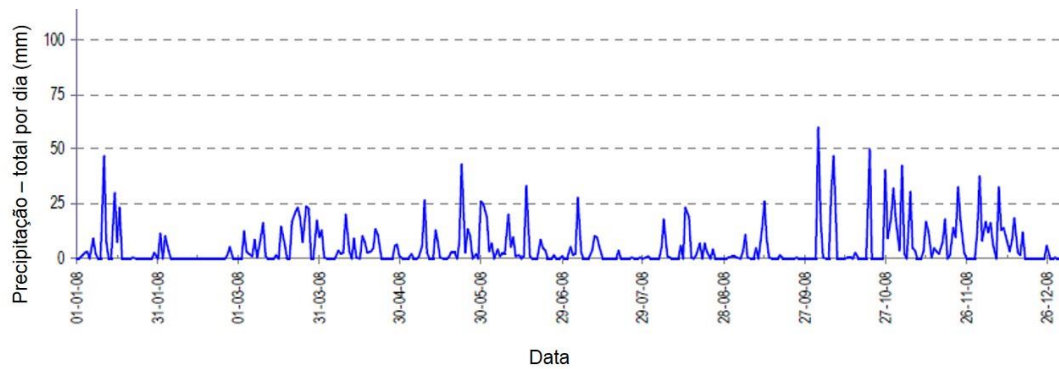


Figura 88 - Precipitação total por dia - ano 2008

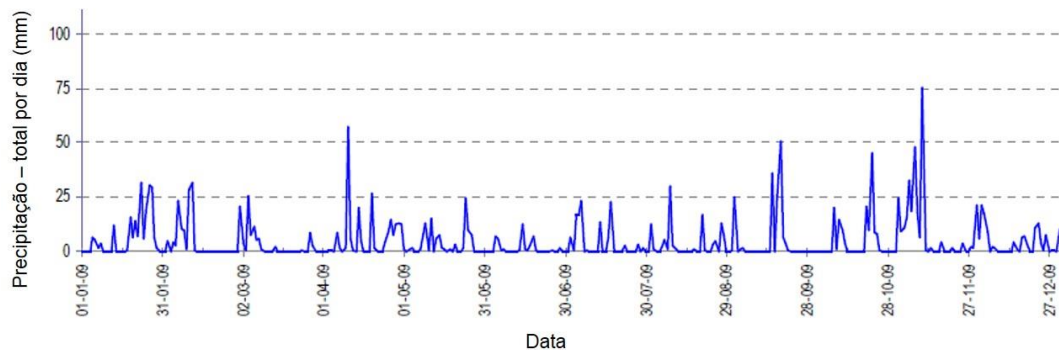


Figura 89 - Precipitação total por dia - ano 2009

2. HUMIDADE RELATIVA

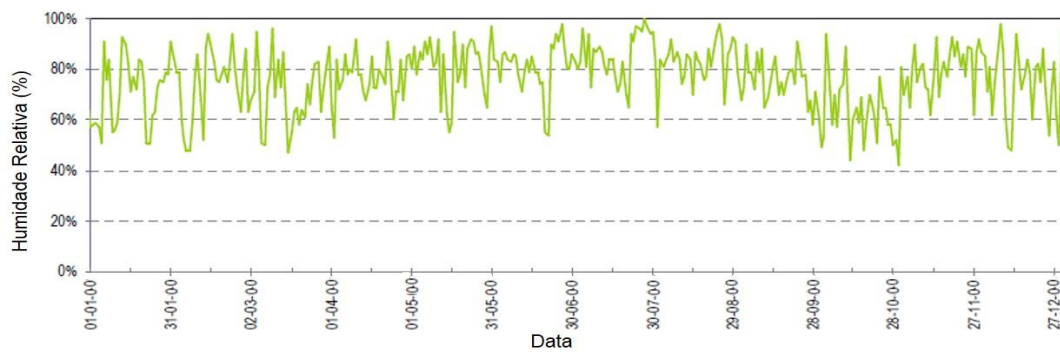


Figura 90 - Umidade relativa - ano 2000

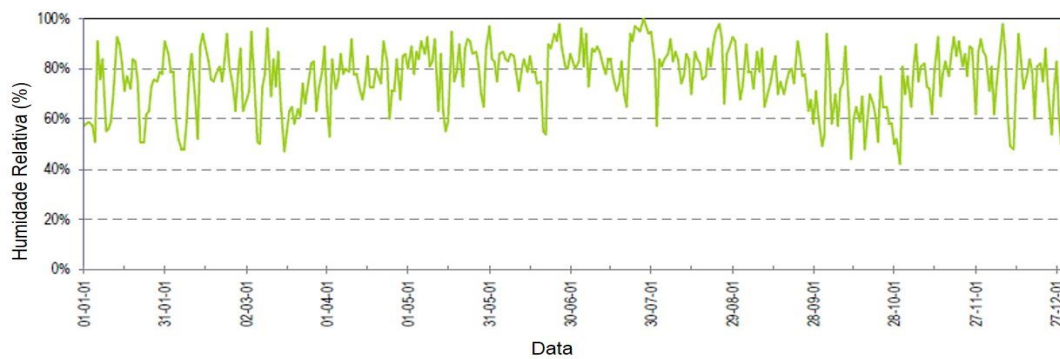


Figura 91 - Umidade relativa - ano 2001

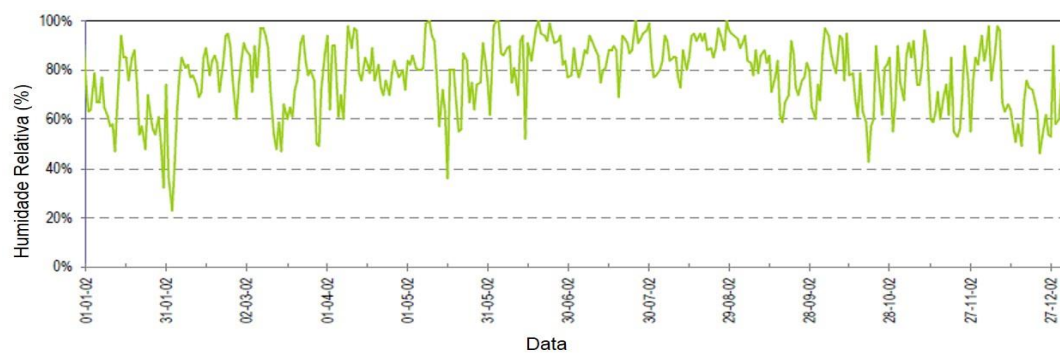


Figura 92 - Umidade relativa - ano 2002

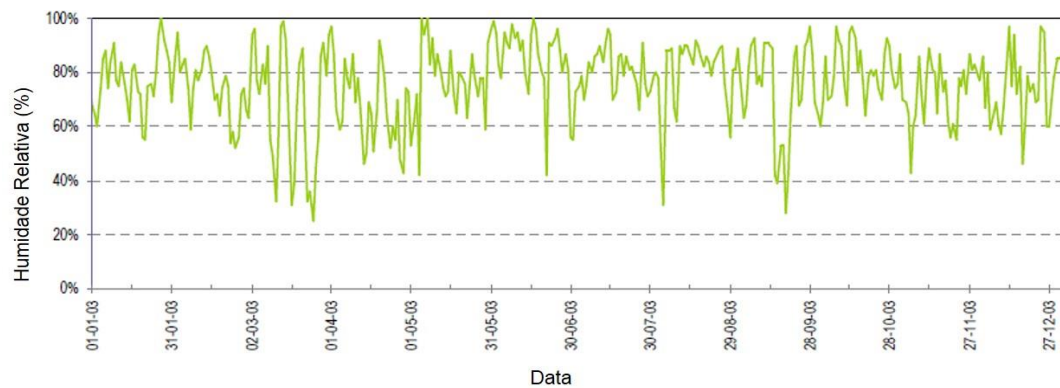


Figura 93 - Umidade relativa - ano 2003

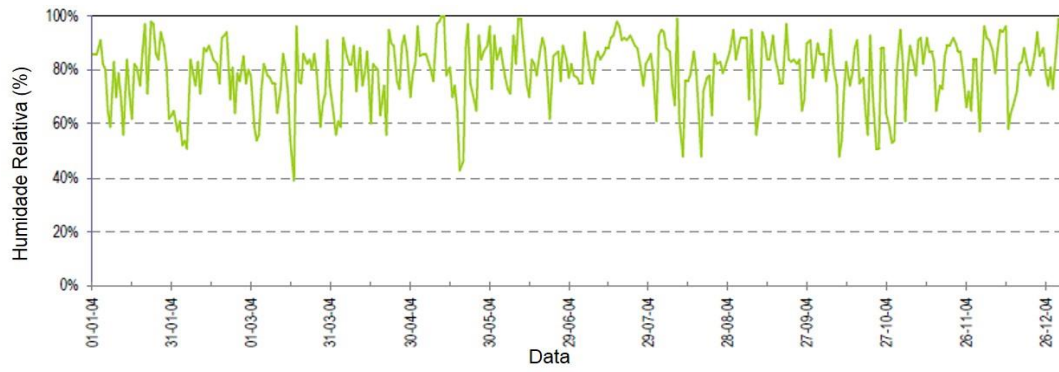


Figura 94 - Humidade relativa - ano 2004



Figura 95 - Humidade relativa - ano 2005

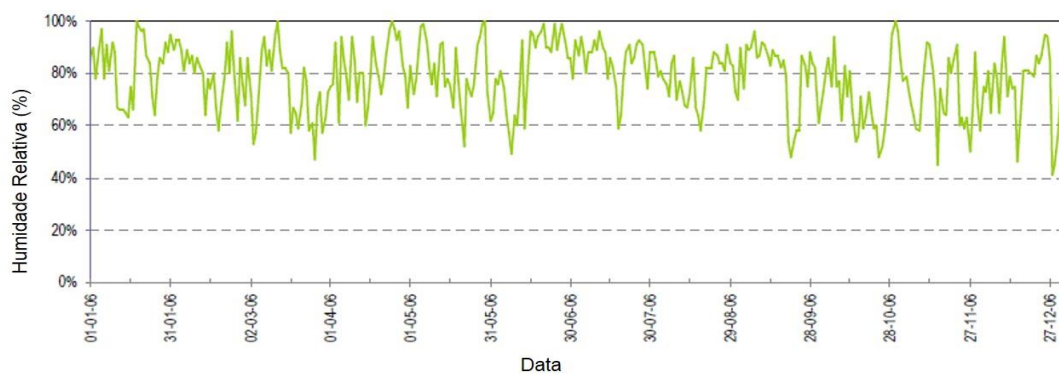


Figura 96 - Humidade relativa - ano 2006

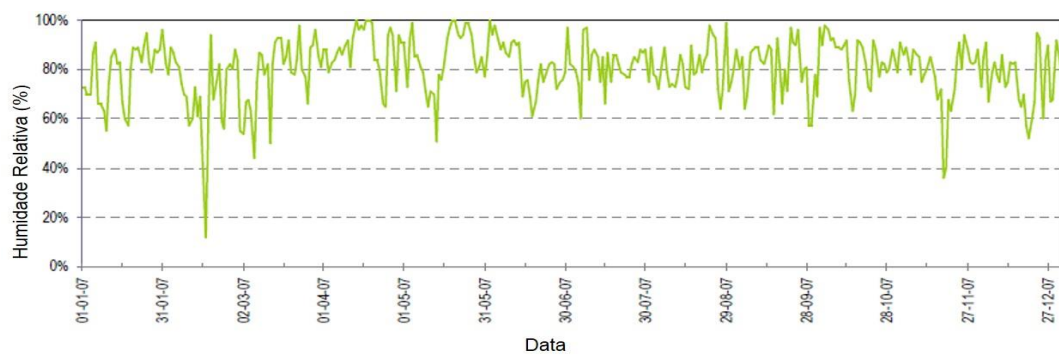


Figura 97 - Humidade relativa - ano 2007

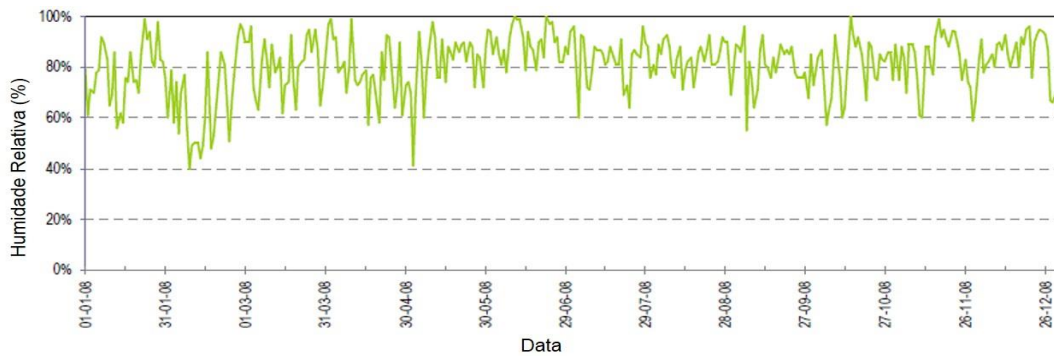


Figura 98 - Humidade relativa - ano 2008

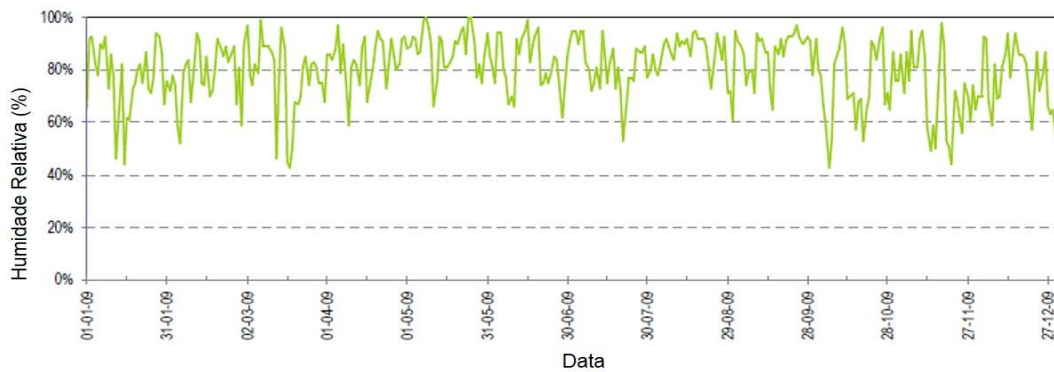


Figura 99 - Humidade relativa - ano 2009

3. TEMPERATURA

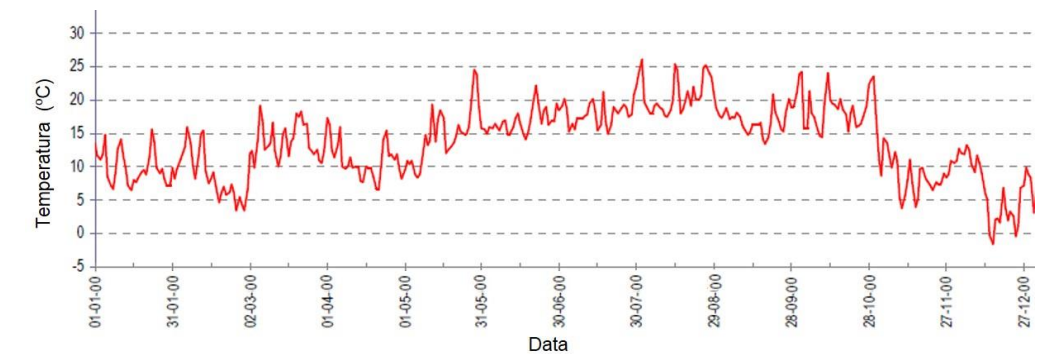


Figura 100 - Temperatura - ano 2000

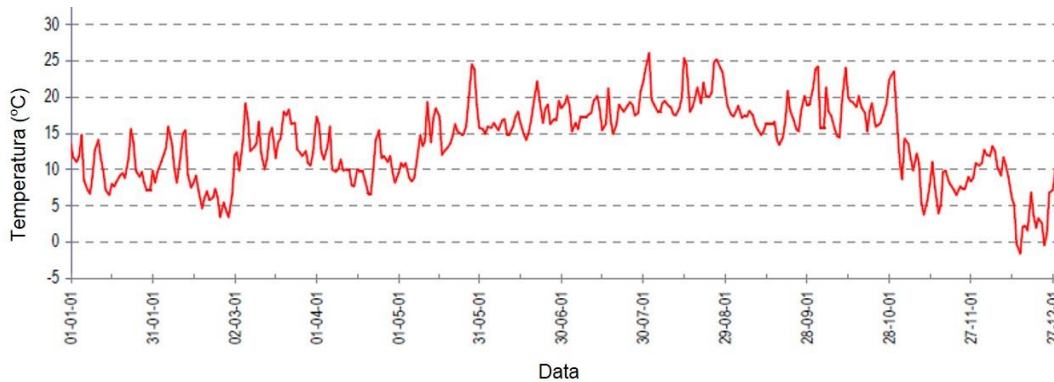


Figura 101 - Temperatura - ano 2001

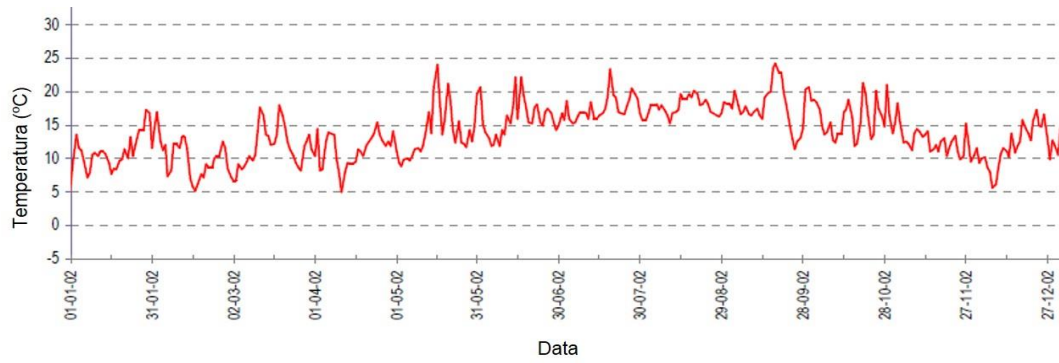


Figura 102 - Temperatura - ano 2002

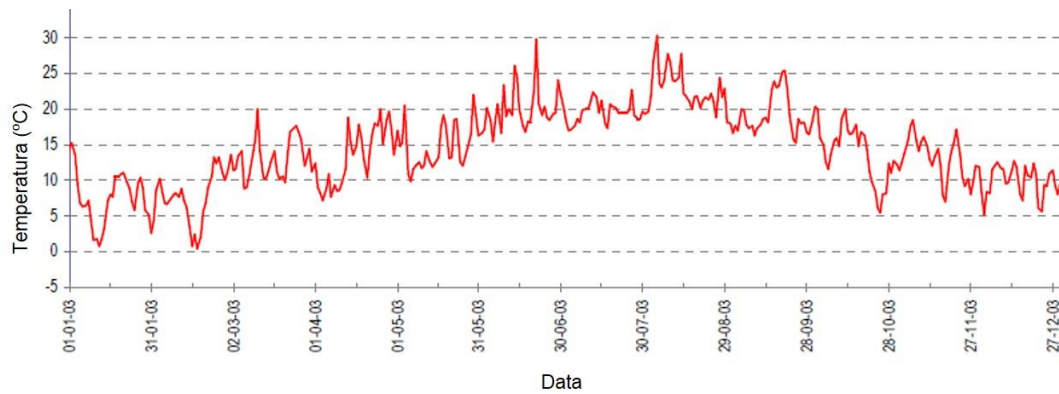


Figura 103 - Temperatura - ano 2003

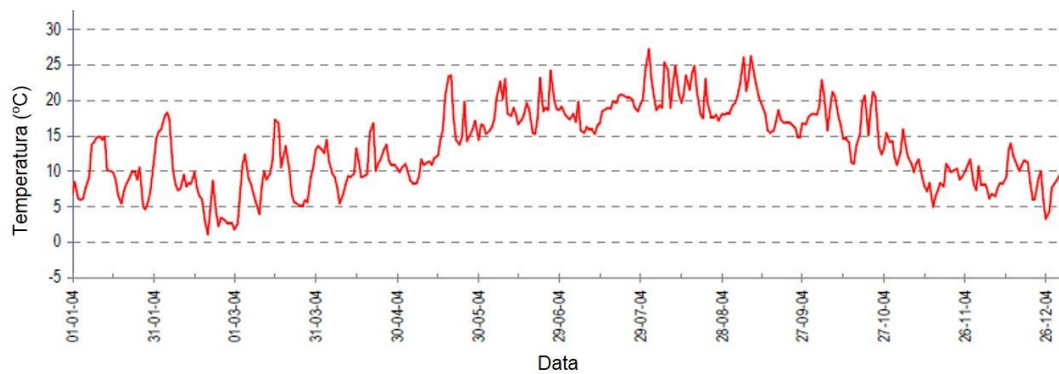


Figura 104 - Temperatura - ano 2004

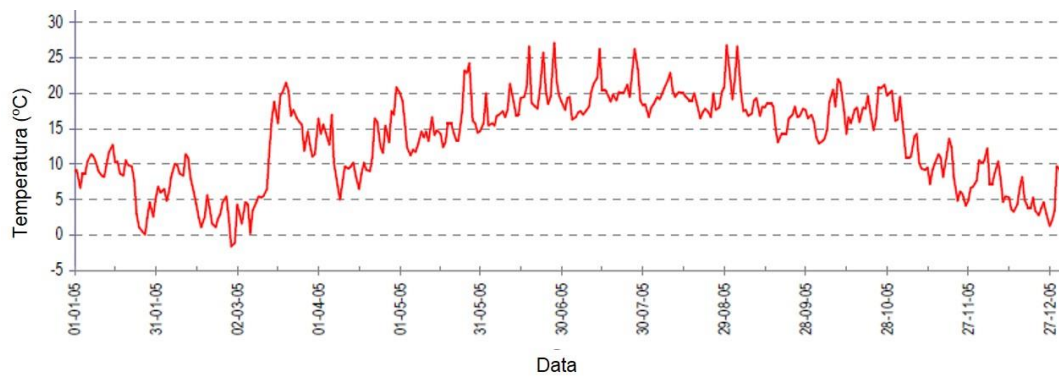


Figura 105 - Temperatura - ano 2005

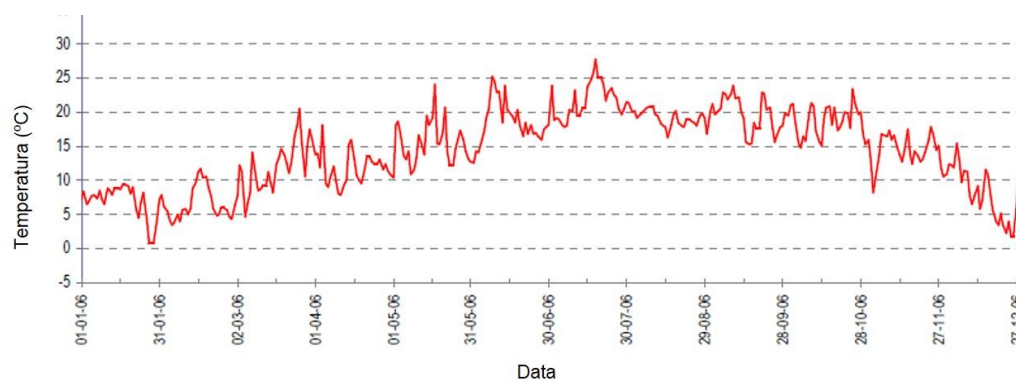


Figura 106 - Temperatura - ano 2006

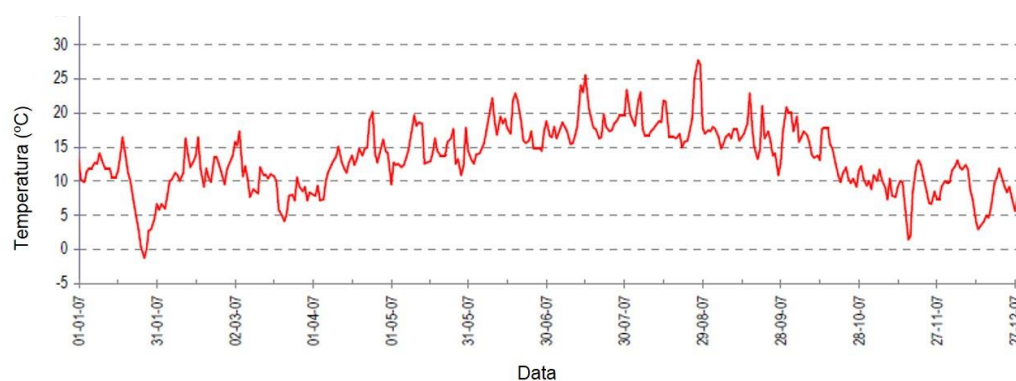


Figura 107 - Temperatura - ano 2007

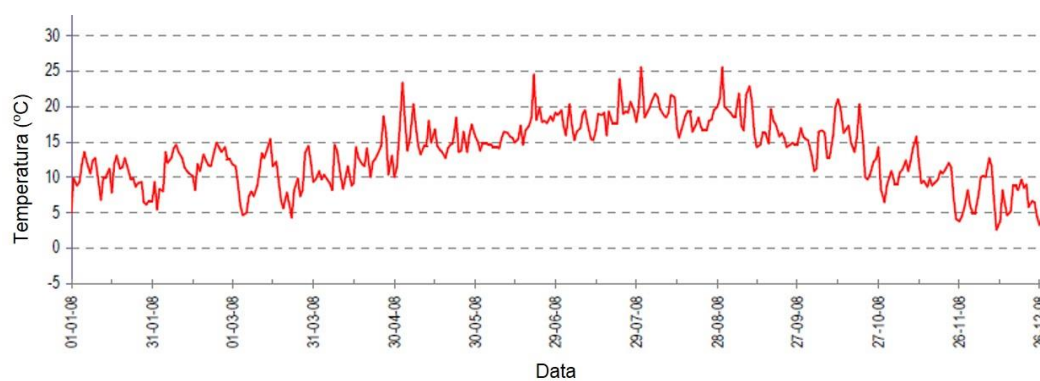


Figura 108 - Temperatura - ano 2008

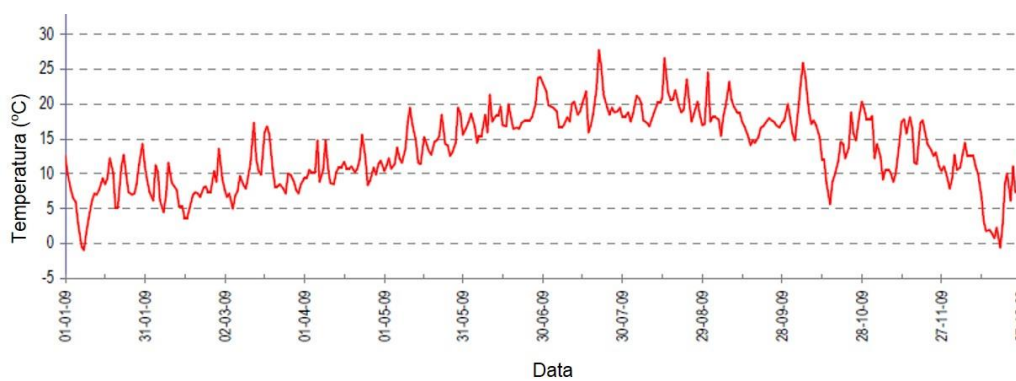


Figura 109 - Temperatura - ano 2009

II. ANTEQUERA: 2001 A 2010

1. TOTAL DA PRECIPITAÇÃO POR DIA

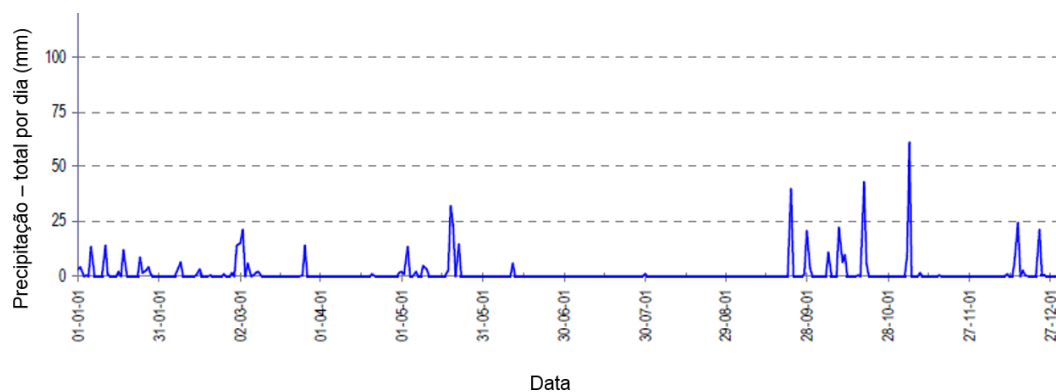


Figura 110 - Precipitação total por dia - ano 2001

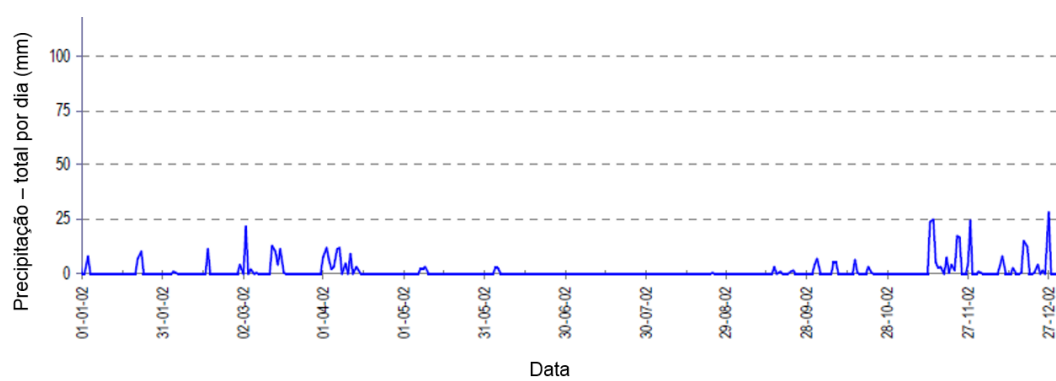


Figura 111 - Precipitação total por dia - ano 2002

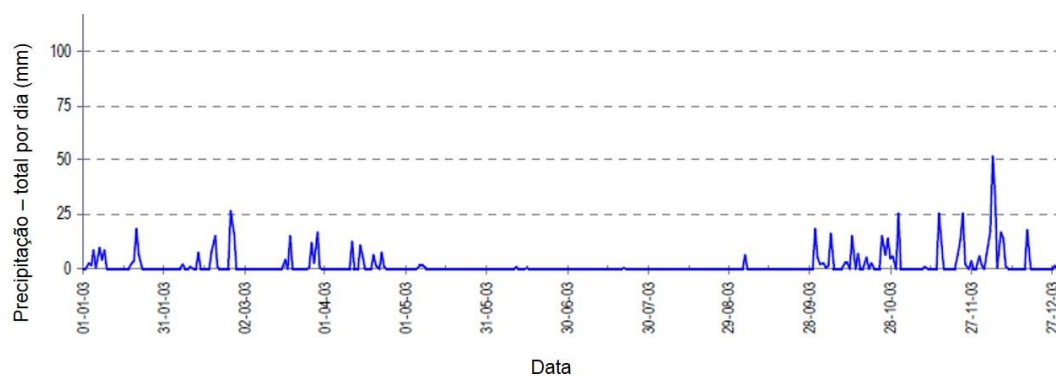


Figura 112 - Precipitação total por dia - ano 2003

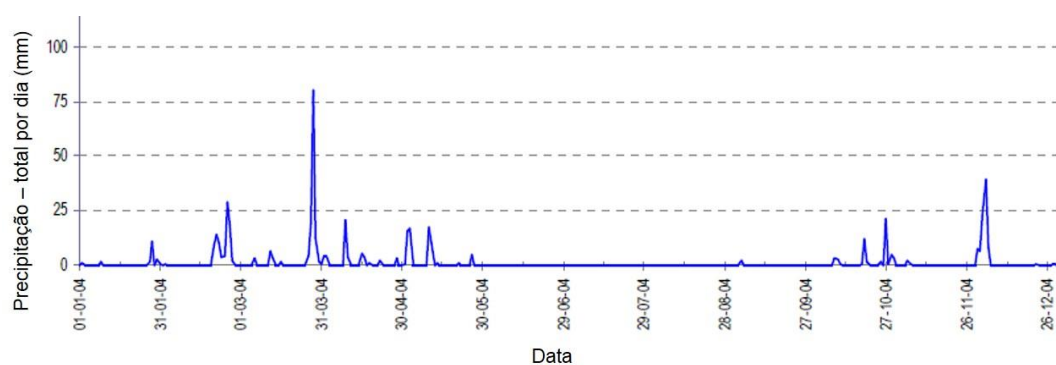


Figura 113 - Precipitação total por dia - ano 2004

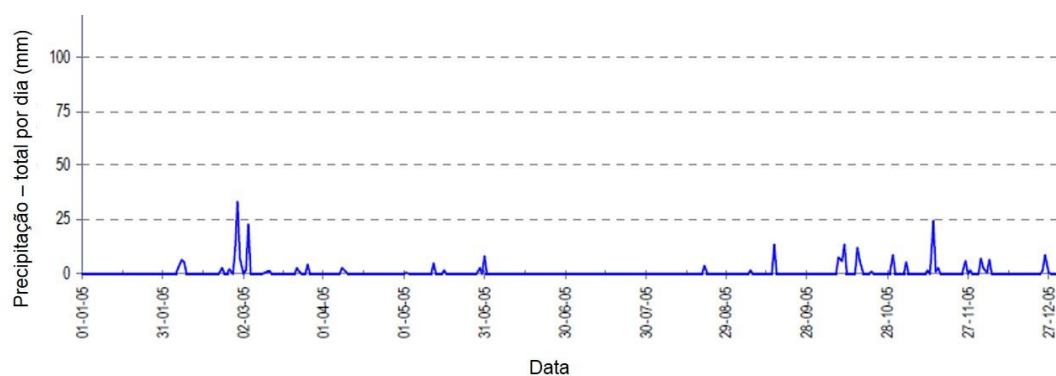


Figura 114 - Precipitação total por dia - ano 2005

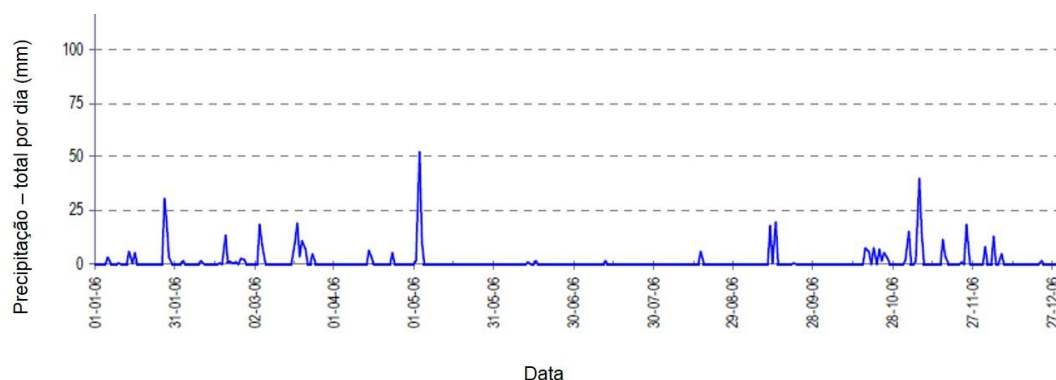


Figura 115 - Precipitação total por dia - ano 2006

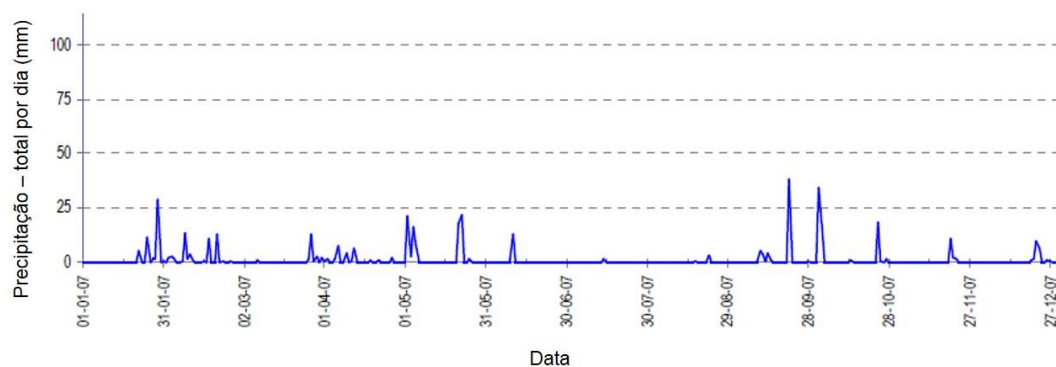


Figura 116 - Precipitação total por dia - ano 2007

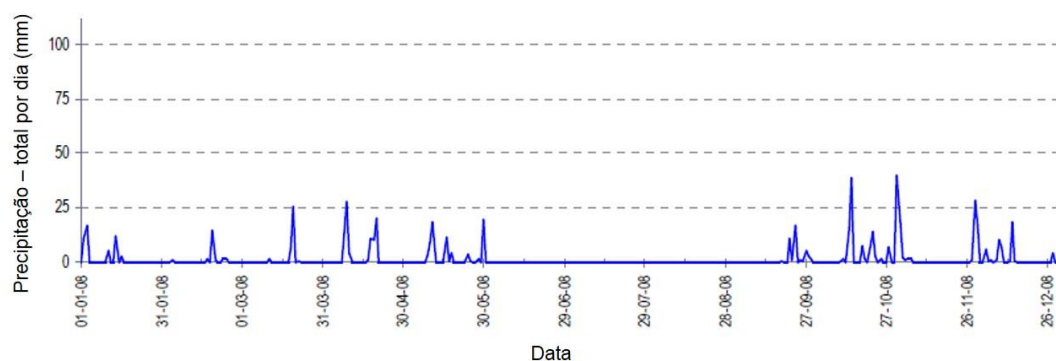


Figura 117 - Precipitação total por dia - ano 2008

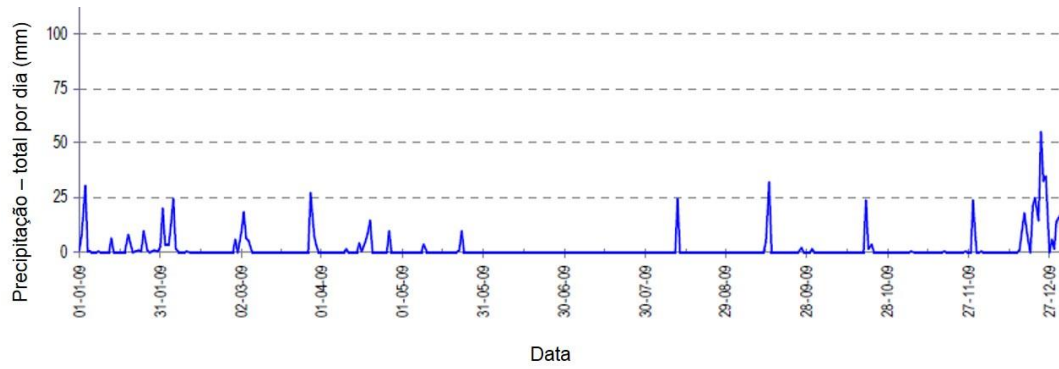


Figura 118 - Precipitação total por dia - ano 2009

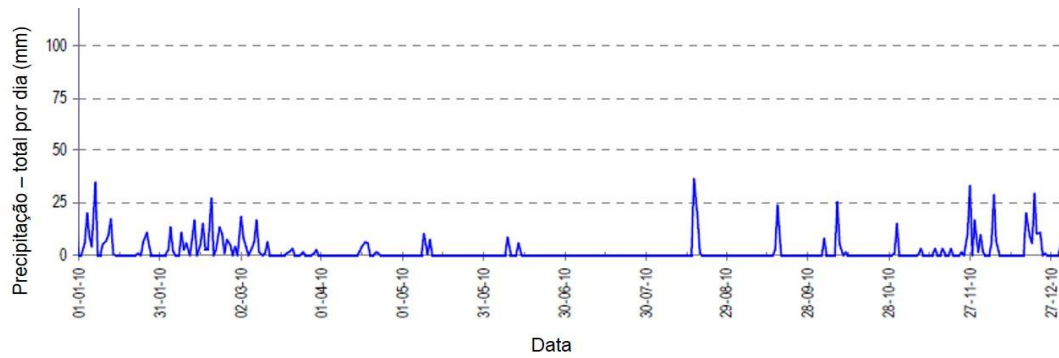


Figura 119 - Precipitação total por dia - ano 2010

2. HUMIDADE RELATIVA

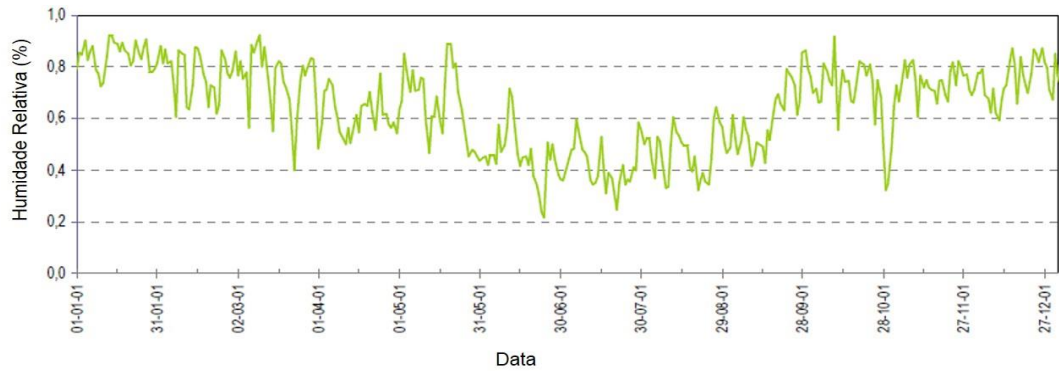


Figura 120 - Humidade relativa - ano 2001

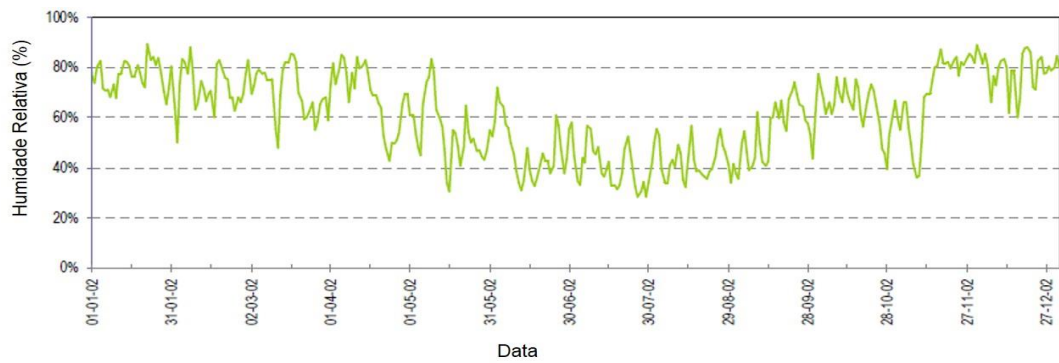


Figura 121 - Humidade relativa - ano 2002

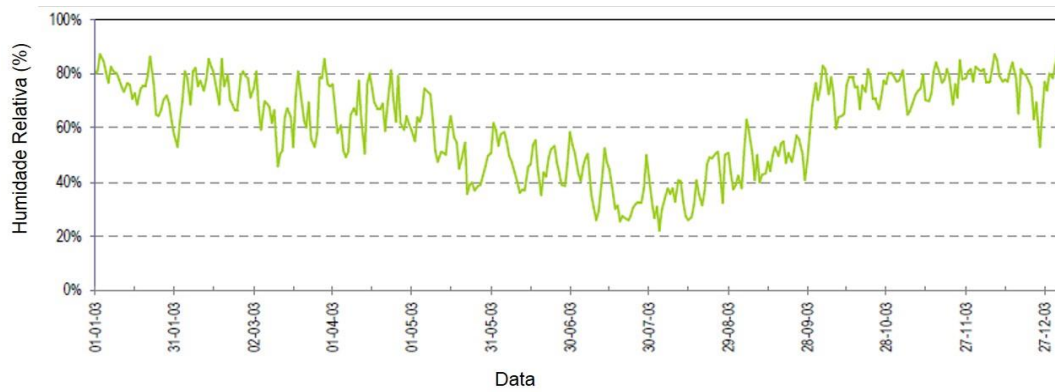


Figura 122 - Humidade relativa - ano 2003

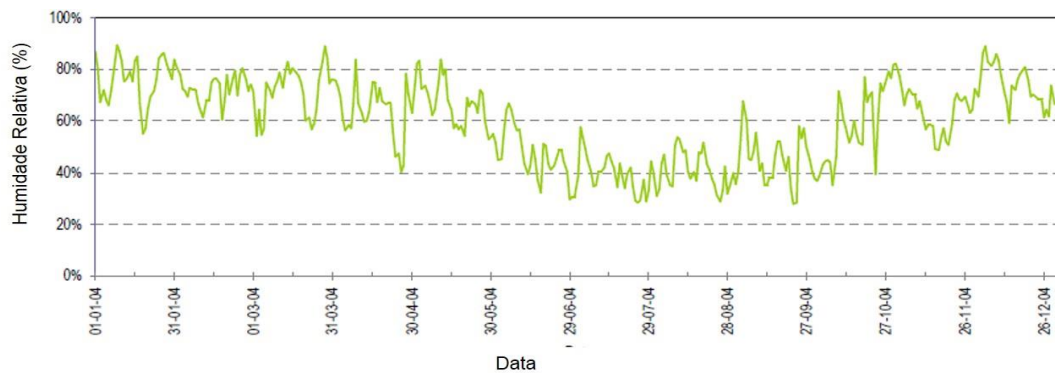


Figura 123 - Humidade relativa - ano 2004

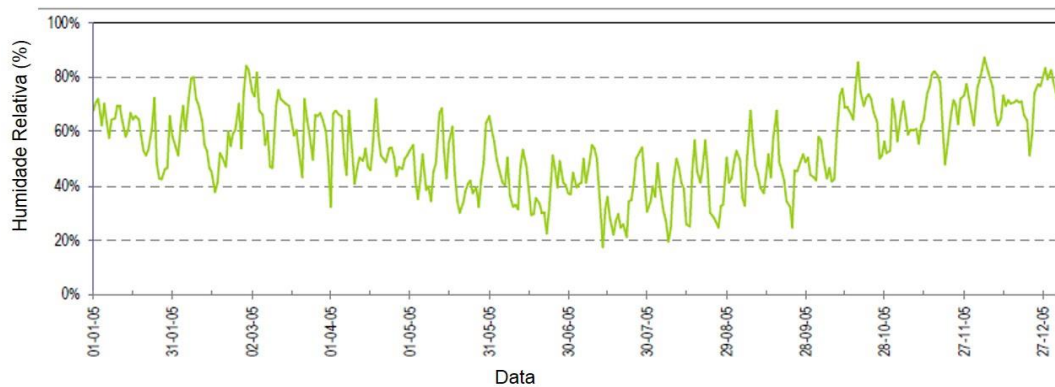


Figura 124 - Humidade relativa - ano 2005

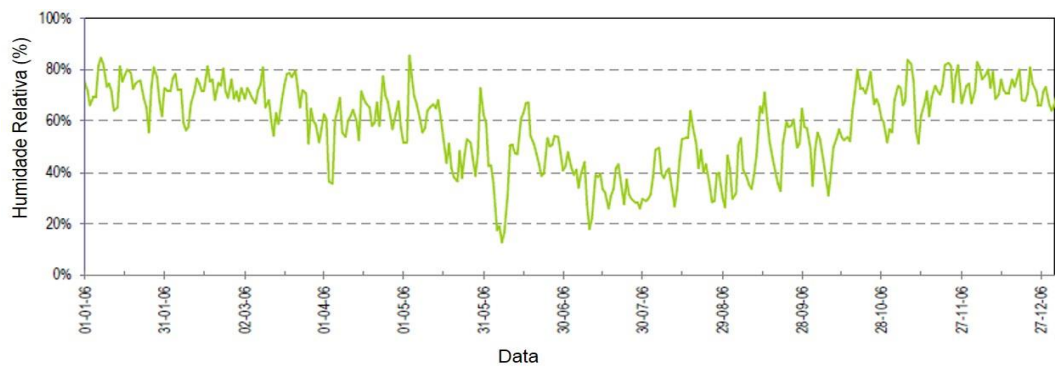


Figura 125 - Humidade relativa - ano 2006

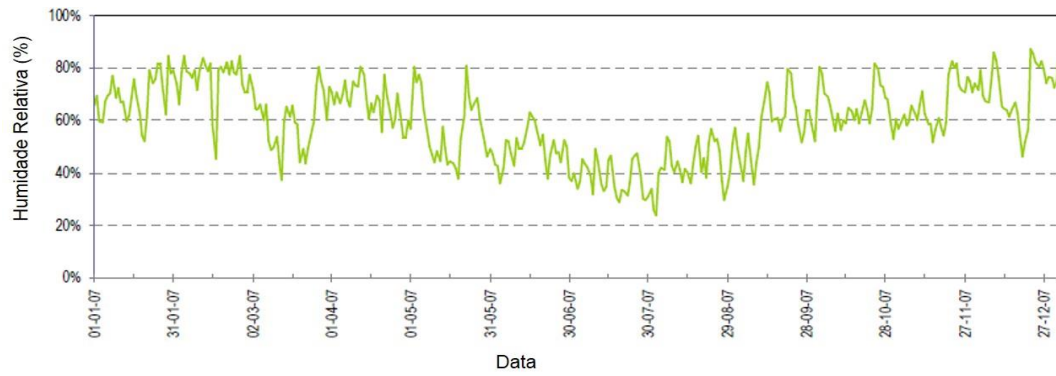


Figura 126 - Humidade relativa - ano 2007

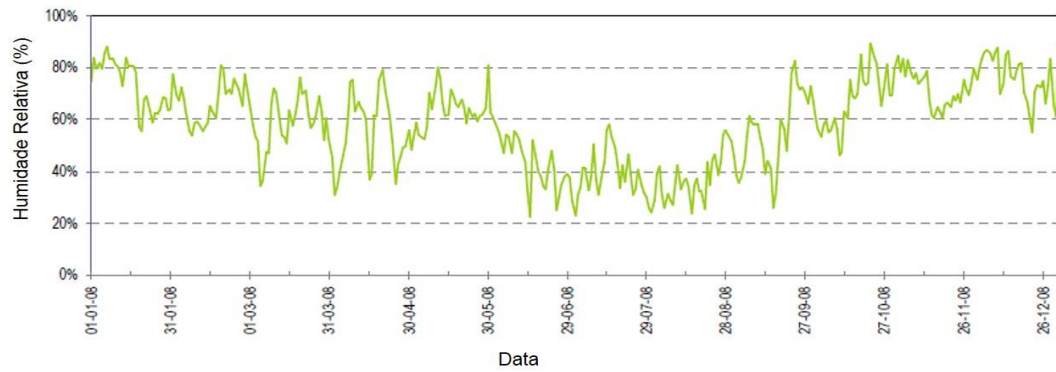


Figura 127 - Humidade relativa - ano 2008

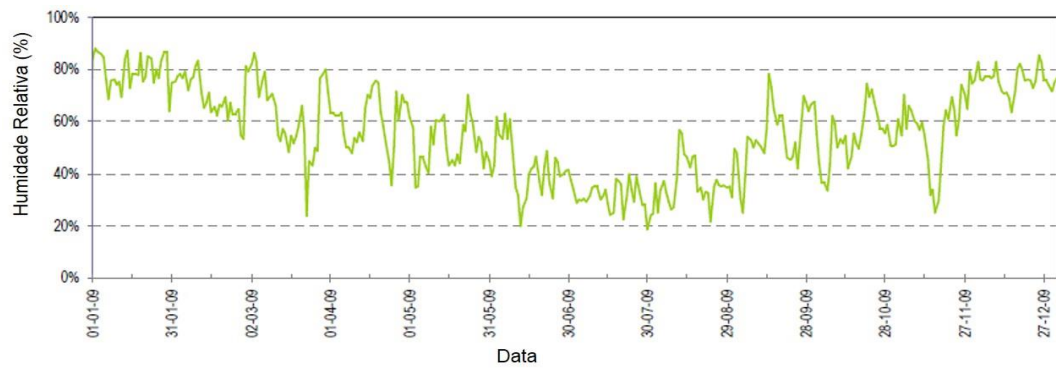


Figura 128 - Humidade relativa - ano 2009

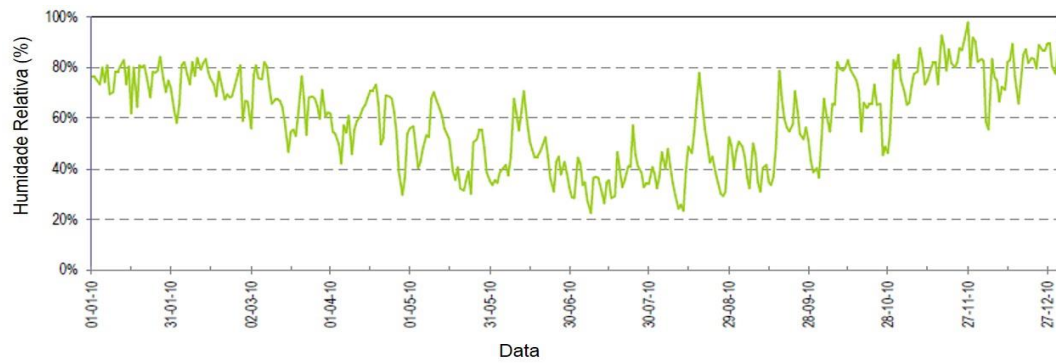


Figura 129 - Humidade relativa - ano 2010

3. TEMPERATURA

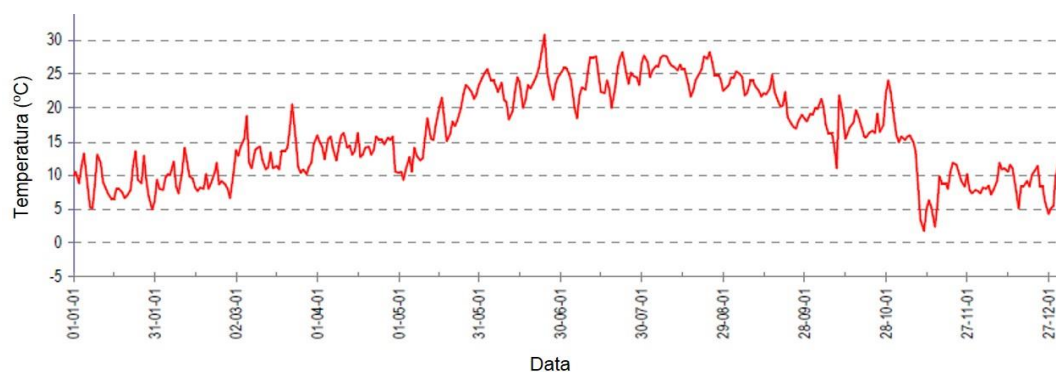


Figura 130 - Temperatura - ano 2001

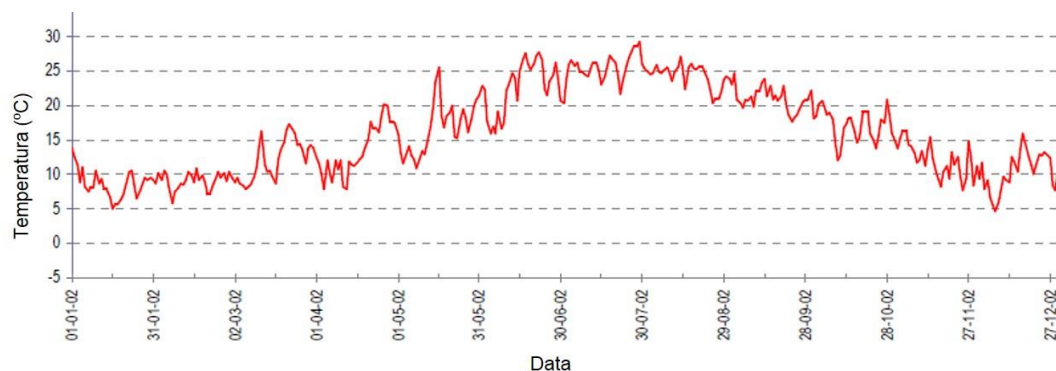


Figura 131 - Temperatura - ano 2002

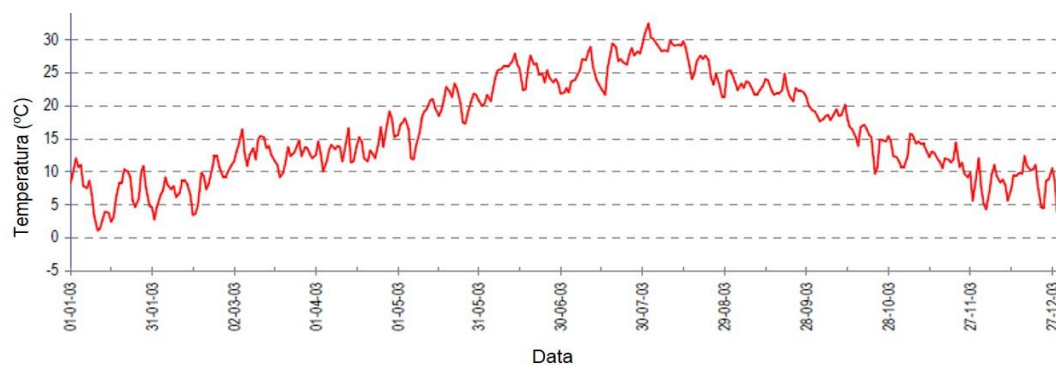


Figura 132 - Temperatura - ano 2003

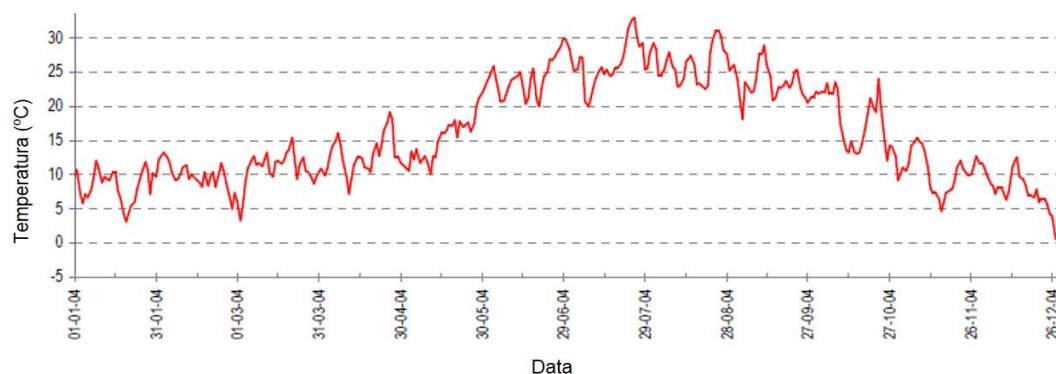


Figura 133 - Temperatura - ano 2004

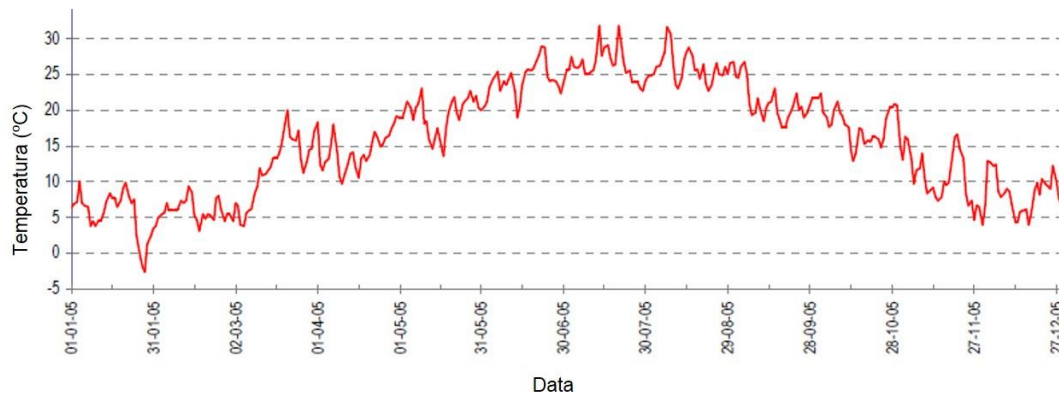


Figura 134 - Temperatura - ano 2005

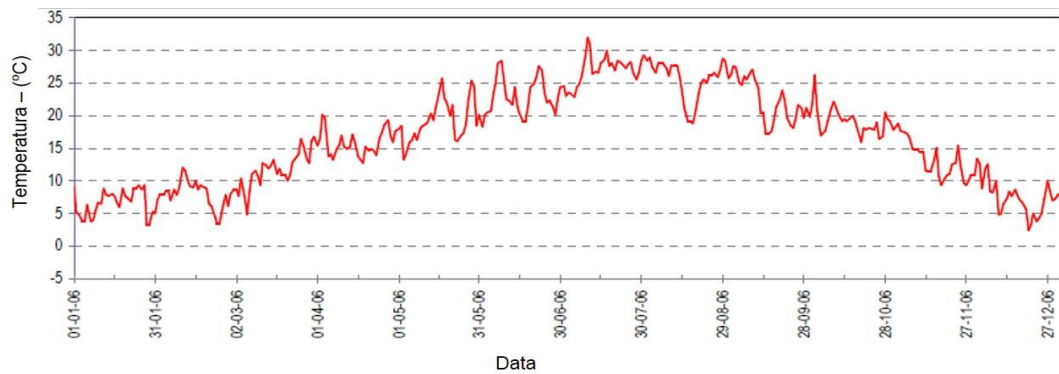


Figura 135 - Temperatura - ano 2006

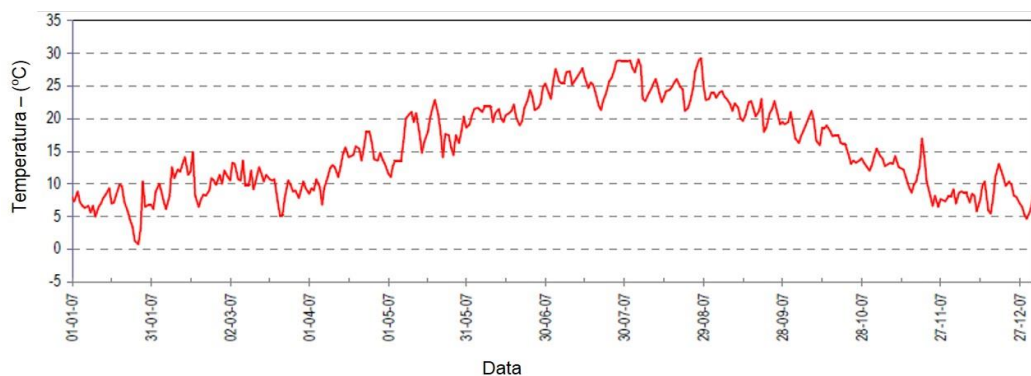


Figura 136 - Temperatura - ano 2007

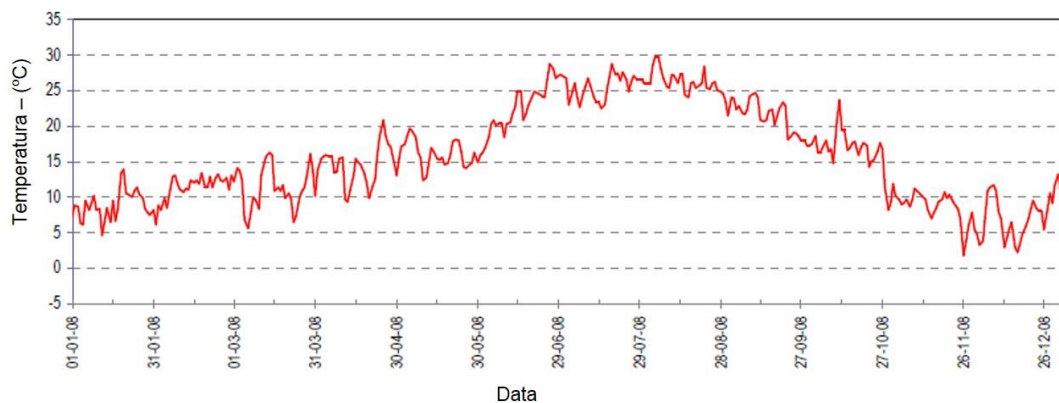


Figura 137 - Temperatura - ano 2008

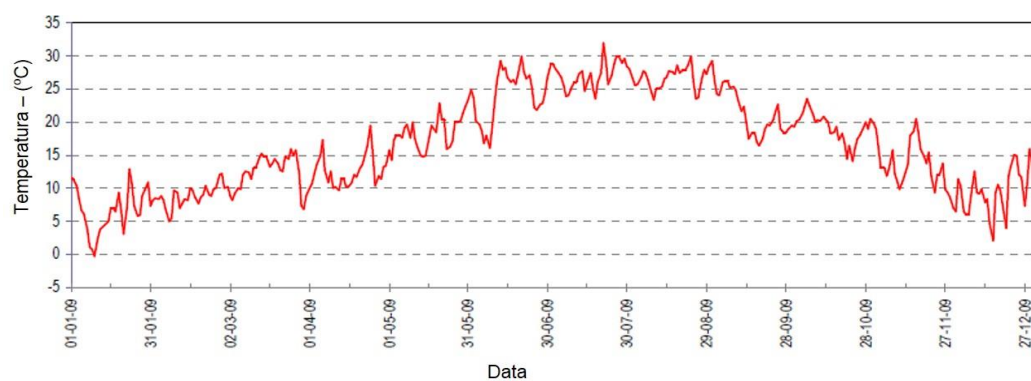


Figura 138 - Temperatura - ano 2009

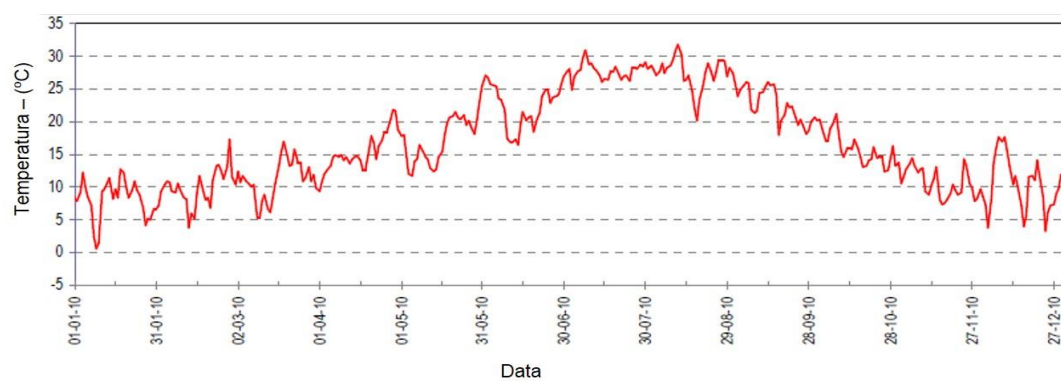


Figura 139 - Temperatura - ano 2010